

# **Impressora FDM tipo Delta: estudo de impressão de cor e comparação de propriedades**

*André Filipe Brandão Moreira da Silva*

**Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Professor Doutor Jorge Lino

Orientador no INEGI: Engenheiro Santiago Castellanos



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Fevereiro 2018

*À Liliana, ao Vítor e aos meus pais.*

## Resumo

Esta dissertação surge na continuação de outras duas, de desenvolvimento e posterior otimização de uma impressora 3D de geometria delta, pelo processo de modelação por extrusão de plástico, com capacidade de impressão com multifilamentos. Os principais aspetos do trabalho passaram pelo estudo das impressoras FDM de geometria delta e estudo da impressão multicolor.

Num passado recente, com o aumento de utilização das impressoras de baixo custo tem-se ido no sentido de estudar as propriedades mecânicas de componentes produzidos por FDM. Com o aparecimento recente de extrusores multimaterial como o *Diamond hotend*, leva à necessidade do estudo da influência da utilização de diferentes cores na resistência das peças impressas.

Este trabalho tem assim por objetivo o estudo do processo de impressão 3D de materiais com diferentes cores, e caracterização das propriedades mecânicas através da análise de massa, microscopia ótica e de ensaios de flexão.

Numa primeira etapa estudaram-se os parâmetros de processo que permitiram melhores resultados na utilização de um extrusor multimaterial de bico único.

Foram realizados dois estudos para avaliar o fabrico de peças de diferentes cores, e da influência da combinação de camadas com diferente cor.

Os resultados demonstraram não haver diferenças significativas na qualidade entre peças de PLA de diferentes cores, no entanto, nos resultados das combinações de cor, demonstraram haver uma dependência das condições de temperatura na qualidade final das peças fabricadas.

**Palavras-chave:** impressão 3D Delta, multicolor, PLA.

# **Delta FDM printer: colour printing analysis and comparison of properties**

## **Abstract**

This dissertation builds upon the research done in two previous dissertations where the development and subsequent optimisation of a delta geometry 3D printer, using a plastic extrusion modelling process with multifilament printing capabilities, was explored. The main target of this dissertation was the analysis of FDM delta geometry printers and its multicolour printing capability.

In the recent past, with the increased use of low-cost printers, it was observed a growing interest in the characterisation of the mechanical properties of components produced by FDM. And with the recent surge of multi-material extruders, such as the Diamond Hotend, there is the need to study how the use of different colours affects the strength of the printed parts.

This work aims to study the 3D printing process of materials with different colours, and characterisation of the mechanical properties through mass analysis, optical microscopy and flexural tests.

Initially, we identified the process parameters that achieved the better results when using a multi-material single-nozzle extruder. Two studies were carried out to evaluate the manufacture of parts of different colours and the influence of the combination of layers with a different colour.

The results showed that there were no significant differences in quality between PLA parts of different colours. However, when colours were combined we could recognise the influence of the temperature conditions on the final quality of the manufactured parts.

**Keywords:** Delta 3D printer, multicolour, PLA.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente estiveram presentes durante o desenvolvimento do trabalho desta dissertação.

Em primeiro lugar, ao orientador deste trabalho, Professor Jorge Lino pela oportunidade de realizar uma dissertação na área da impressão 3D, por toda a disponibilidade e por ter possibilitado os recursos necessários à realização deste trabalho.

Ao engenheiro Santiago Castellanos, orientador deste trabalho, por toda a paciência, palavras de incentivo, e orientação durante toda a dissertação.

Ao Leonardo Santana, por toda a motivação, disponibilidade e partilha de conhecimento que permitiu que este trabalho, se tornasse um trabalho melhor.

Ao Edwin Gárzon pela motivação e por nunca ter negado um pedido de auxílio.

Ao Sr. Rui Silva do LET pela disponibilidade para a realização dos ensaios de flexão.

Ao Joaquim Regadas pela partilha de informação e de funcionamento da impressora numa fase inicial do trabalho.

Um obrigado a todos a todos os meus amigos que me acompanharam e incentivaram, em especial ao Paulo Santos pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, por sempre me apoiarem e me as darem condições necessárias ao longo deste percurso.

Ao meu irmão, Vítor, por toda a motivação, amizade e apoio incondicional, ao longo deste trabalho e sempre.

À Liliana, por todo o amor, paciência e compreensão, para me apoiar e motivar ao longo deste trabalho.

Ao projeto NORTE-01-0145-FEDER-000022 - SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

# Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação .....	1
1.2	Motivação.....	1
1.3	Objetivos do projeto .....	1
1.4	Metodologia.....	1
1.5	Estrutura da dissertação .....	2
2	Estado da arte .....	3
2.1	Fabrico Aditivo .....	3
2.2	Processo de FDM .....	3
2.3	Impressora 3D de geometria Delta .....	5
2.4	Impressão com múltiplas cores.....	7
2.4.1	Múltiplos Extrusores.....	7
2.4.2	Bico extrusor único.....	8
2.4.3	Palette+ .....	10
2.5	Softwares de <i>slicing</i> e controlo.....	12
2.6	Materiais.....	12
2.7	Parâmetros de impressão e propriedades mecânicas .....	14
2.7.1	Propriedades mecânicas.....	15
2.7.2	Influência da cor nas propriedades dos materiais.....	16
2.8	Impressora delta do LDPS .....	17
3	Impressora Delta - Estudo de calibração e impressão multicolor .....	19
3.1	Calibração da movimentação .....	19
3.1.1	Nivelação da base.....	19
3.1.2	Cinemática inversa delta .....	21
3.1.3	Calibração dos motores passo-a-passo da movimentação.....	22
3.1.4	Verificação da calibração do movimento .....	23
3.2	Calibração da alimentação de filamento .....	24
3.2.1	Calibração dos motores do módulo extrusão .....	26
3.2.2	Calibração da alimentação no <i>firmware</i> .....	27
3.3	<i>Diamond hotend</i> e temperaturas.....	28
3.4	Impressão multicolor .....	31
3.4.1	Retração de filamento.....	31
3.4.2	Influência do tamanho na qualidade de impressão.....	37
3.4.3	Etapas de impressão multicolor.....	38
3.4.4	Caso prático: anel tricolor .....	41
3.4.5	Caso prático: modo vaso .....	42
3.5	Teoria da mistura de cor .....	44
3.6	Análise qualitativa impressão delta .....	45
4	Métodos e Materiais .....	49
4.1	Metodologia.....	49
4.2	Medição da massa específica dos materiais.....	56
4.3	Caso de estudo 1: comparação entre cores.....	57
4.4	Caso de estudo 2: combinação de camadas de cor .....	57
5	Resultados e discussões .....	59
5.1	Massa específica dos materiais .....	59
5.2	Caso de estudo: cores sólidas .....	59
5.3	Caso de estudo: combinação de camadas de cor .....	67
6	Conclusões e trabalhos futuros.....	77
6.1	Conclusão .....	77
6.2	Trabalho futuros .....	78
	Referências .....	79
ANEXO A:	ANOVA do ensaio de retração .....	82
ANEXO B:	Ficha técnica do filamento BQ.....	83
ANEXO C:	Curvas tensão deformação das amostras.....	84

## Siglas

3D – Tridimensional

ABS – Acrilonitrilo Butadieno Estireno

AMF – *Additive Manufacturing File Format*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer Aided Design*

CAM – *Computer Aided Manufacturing*

CNC – *Computer Numeric Control*

DEMec – Departamento de Engenharia Mecânica

EEPROM – *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*

F – Valor F da análise de variância

FA – Fabrico Aditivo

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FFF – *Fused Filament Fabrication*

GL – Grau de Liberdade

HIPS – Poliestireno de alto impacto

LCD – *Liquid Crystal Display*

LDPS – Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços

LET – Laboratório de Ensaios Tecnológicos

NTC – *Negative Temperature Coefficient*

P – Valor F da análise de variância

PC – Policarbonato

PET – Polietileno Teraftalato

PETG – Polietileno Teraftalato modificado com Glicol

PLA – Ácido Polilático

PTFE - Politetrafluoretileno

PVA – Acetato de Polivinilo

RAMPS – *RepRap Arduino Mega Polulu Shield*

SQ – Soma dos Quadrados

STL – *Standard Triangle Language*

TPU – Poliuretano Termoplástico

VREF – Tensão de Referência

## Lista de Símbolos

A – Amostra

$\alpha$  – Ângulo

DP – Desvio padrão

$\sigma_f$  – Tensão normal à flexão

$\sigma_{fm}$  – Tensão máxima à flexão

$\varepsilon$  – Deformação

$E_f$  – Módulo de Elasticidade à flexão

$T_g$  – Temperatura de transição vítrea

$T_m$  – Temperatura de fusão

$\bar{X}$  – Média



## Índice de Figuras

Figura 1 - Processo de Fabrico Aditivo. ....	3
Figura 2 - Processo de FDM [4]. ....	4
Figura 3 - Etapas da impressão 3D. Adaptado de [3]. ....	4
Figura 4 - Máquina de geometria Delta. Adaptado de [3]. ....	5
Figura 5 - Impressora Delta DreamMaker Overlord Pro [6]. ....	6
Figura 6 - HE3D K200 DUAL EXTRUDER [7]. ....	6
Figura 7 - Impressora Geeetech Rostock 301 com Diamond hotend [9]. ....	7
Figura 8 - Extrusores duplos [10]. ....	7
Figura 9 - Exemplos de peças fabricadas com extrusor duplo. ....	8
Figura 10 - Bico extrusor E3D Cyclops [11]. ....	8
Figura 11 - Elementos do Diamond hotend. ....	9
Figura 12 - Peças impressas com o Diamond hotend [14]. ....	9
Figura 13 - Equipamento Palette+ e peças fabricadas [15]. ....	10
Figura 14 - Esquema de funcionamento do Palette+ [15]. ....	10
Figura 15 - União de filamentos pelo Palette+ [15]. ....	11
Figura 16 - Exemplos de peças com diferentes materiais fabricadas no Palette+ [15]. ....	11
Figura 17 - Ângulos de impressão (a) retilíneo (b) honeycomb (c) Archimedes. ....	14
Figura 18 - Preenchimento nas percentagens (a) 20 % (b) 50 % e (c) 100 %. ....	14
Figura 19 - Ligação entre filamentos. Adaptado de [22]. ....	15
Figura 20 - Impressora delta do LDPS. ....	17
Figura 21 - Etapas de nivelção da base. ....	20
Figura 22 - Pontos de calibração [35]. ....	20
Figura 23 - Relações geométricas delta. Adaptado de [3]. ....	21
Figura 24 - Movimentos convexo e côncavo do extrusor. ....	22
Figura 25 - Medição da tensão no driver DVR8825. ....	23
Figura 26 - Impressão da peça de calibração e relações geométricas. ....	24
Figura 27 - Fenómenos de impressão Delta de (a) sob extrusão (b) sobre extrusão. ....	25
Figura 28 - Análise da extrusão livre de filamento (a) não calibrado (b) calibrado. ....	25
Figura 29 - Medição de tensão no driver A4988. ....	26
Figura 30 - Placa de extensão e configuração de microstepping. ....	26
Figura 31 - Definição de passos/mm no firmware. ....	27
Figura 32 - Ajuste dos parafusos do extrusor. ....	28
Figura 33 - Esquema do escoamento indevido de filamento no Diamond hotend. ....	28
Figura 34 - Medição de temperatura no Diamond hotend. ....	29
Figura 35 - Esquema de entupimento do diamond hotend. ....	30
Figura 36 - Montagem dos tubos de bowden. ....	31

Figura 37 - Filtros do filamento.....	31
Figura 38 - Influência da retração (a) sem retração (b) com retração. ....	32
Figura 39 - Formação de stringing. ....	32
Figura 40 - Definição de retração por firmware no Marlin. ....	33
Figura 41 - Resultados do estudo de retração.....	35
Figura 42 - Escorregamento de filamento na engrenagem. ....	36
Figura 43 - Resultados da influência de tamanho às escalas (a) 50 % (b) 100 % (c) 150 %..	38
Figura 44 - Cone em cor sólida. ....	39
Figura 45 - Divisão do cone em diferentes STL.....	39
Figura 46 - Criação de modelo AMF no Autodesk Meshmixer. ....	39
Figura 47 - Cone no Repetier Host.....	40
Figura 48 - Estatísticas de impressão no Slic3r.....	41
Figura 49 - Cone multimaterial produzido. ....	41
Figura 50 - Anel tricolor no Repetier Host.....	42
Figura 51 - Resultados do anel obtido e pormenor da transição de cor.....	42
Figura 52 - Costura na união de filamento. ....	43
Figura 53 - Etapas de impressão de um vaso.....	43
Figura 54 - Mistura de cores com Diamond hotend [49]. ....	44
Figura 55 - Alteração no firmware de bico único.....	44
Figura 56 - Definição de extrusor de mistura no firmware. ....	45
Figura 57 - Desenho esquemático dos provetes (a) no plano (b) lateral. ....	49
Figura 58 - Posicionamento das camadas de cor.....	49
Figura 59 - Simulação no Slic3r com 100% de largura de camada. (a) no plano (b) lateral....	51
Figura 60 - Simulação no Slic3r com 100 % de largura de camada. (a) no plano (b) lateral...	52
Figura 61 - Provetes no Repetier Host nas orientações (a) no plano (b) lateral.....	53
Figura 62 - Amostras produzidas.....	54
Figura 63 - Máquina de ensaio. ....	55
Figura 64 - Diagrama do procedimento experimental.....	56
Figura 65 - Amostras de filamento.....	57
Figura 66 - Representação da massa média do caso 1.....	60
Figura 67 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 3.....	61
Figura 68 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 3.....	61
Figura 69 - Representação da Tensão Máxima à flexão média no caso 1.....	62
Figura 70 - Representação do Módulo de Elasticidade médio no caso 1.....	63
Figura 71 - Representação da influência dos níveis de cor sobre a Tensão Máxima à flexão .	64
Figura 72 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Tensão Máxima à flexão .....	65

Figura 73 - Representação da influência dos níveis de cor sobre a Módulo de Elasticidade à flexão. ....	66
Figura 74 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Módulo de Elasticidade à flexão. ....	66
Figura 75 - Resultados da massa média do caso 2. ....	68
Figura 76 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 9.....	69
Figura 77 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 9.....	69
Figura 78 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 6.....	70
Figura 79 - Representação da Tensão Máxima à flexão média no caso 2.....	71
Figura 80 - Representação do Módulo de Elasticidade médio no caso 2. ....	72
Figura 81 - Representação da influência dos níveis de combinação de cor sobre a Tensão Máxima à flexão. ....	73
Figura 82 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Tensão Máxima à flexão. ....	73
Figura 83 - Representação da influência dos níveis de combinação cor sobre a Módulo de Elasticidade à flexão. ....	74
Figura 84 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Módulo de Elasticidade à flexão. ....	75
Figura 85 - Modo de rotura das amostras (a) 2 da condição 2 (b) 2 da condição 3 (c) 2 da condição 11.....	75
Figura 86 - Modo de rotura das amostras (a) 3 da condição 12 (b) 3 da condição 10 (c) 3 da condição 4.....	76
Figura 87 - Gráfico do teste de Tukey para a diferença das médias para a massa. ....	82
Figura 88 - Gráfico de efeitos principais para a massa segundo a média dos dados.....	82
Figura 89 - Ficha técnica do filamento BQ. ....	83
Figura 90 - Curva tensão-deformação da condição 1 do caso de estudo 1.....	84
Figura 91 - Curva tensão-deformação da condição 4 do caso de estudo 1.....	84
Figura 92 - Curva tensão-deformação da condição 1 do caso de estudo 2.....	85
Figura 93 - Curva tensão-deformação da condição 7 do caso de estudo 1.....	85
Figura 94 - Curva tensão-deformação da condição 3 do caso de estudo 2.....	86
Figura 95 - Curva tensão-deformação da condição 9 do caso de estudo 2.....	86

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Softwares CAM e de controlo. ....	12
Tabela 2 - Propriedades de materiais para impressão 3D. Adaptado de [17]. ....	13
Tabela 3 - Propriedades do PLA. Adaptado de [18]. ....	13
Tabela 4 - Softwares e hardwares da impressora delta. ....	18
Tabela 5 - Relações geométricas delta no Marlin firmware. Adaptado de [3]. ....	22
Tabela 6 - Combinação de jumpers do driver DVR8825. ....	23
Tabela 7 - Resultados da peça de calibração. ....	24
Tabela 8 - Combinação de jumpers do driver A4988. ....	26
Tabela 9 - Valores de alimentação de filamento. ....	27
Tabela 10 - Características das ventoinhas dos dissipadores de calor [39]. ....	29
Tabela 11 - Parâmetros e níveis de retração avaliados. ....	33
Tabela 12 - Condições do estudo de retração. ....	34
Tabela 13 - Resultados de massa do estudo de retração. ....	36
Tabela 14 - Análise de variância para a massa. ....	37
Tabela 15 - Análise de impressão. ....	46
Tabela 16 - Fatores e níveis do caso 1. ....	50
Tabela 17 - Posicionamento das camadas de cor no caso 1. ....	50
Tabela 18 - Posicionamento das combinações de cor no caso 2. ....	50
Tabela 19 - Parâmetros fixos de impressão. ....	52
Tabela 20 - Parâmetros do caso de estudo 1. ....	57
Tabela 21 - Parâmetros do caso de estudo 2. ....	58
Tabela 22 - Massa específica aparente dos filamentos. ....	59
Tabela 23 - Resultados da medição de massa dos provetes. ....	59
Tabela 24 - Resultados de Tensão Máxima média $\sigma_{fm}$ e Módulo de Elasticidade médio $E_f$ médio. ....	62
Tabela 25 - Análise de variância para a Tensão Máxima. ....	63
Tabela 26 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade. ....	65
Tabela 27 - Resultados da medição de massa dos provetes. ....	67
Tabela 28 - Resultados de Tensão Máxima média $\sigma_{fm}$ e Módulo de Elasticidade médio $E_f$ médio. ....	70
Tabela 29 - Análise de variância para a Tensão Máxima. ....	72
Tabela 30 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade. ....	74

# **1 Introdução**

## **1.1 Enquadramento do projeto e motivação**

A presente dissertação pretende dar continuidade a dois trabalhos realizados em anos letivos anteriores de desenvolvimento e otimização de uma impressora FDM do tipo Delta presente no Laboratório de Desenvolvimento de Produtos e Serviços (LDPS) do DEMec/FEUP.

O aparecimento recente de extrusores multimaterial, faz com que haja ainda poucos estudos científicos sobre a resistência de materiais produzidos com combinação de vários materiais. Este trabalho tenciona, portanto, colmatar essa lacuna e estudar as propriedades de peças multicolores.

## **1.2 Motivação**

A motivação advém do interesse nas impressoras de FDM de baixo custo e filosofia *open-source*. O facto de ter uma grande componente prática e a presença de vários equipamentos no LDPS, permitindo um conhecimento mais alargado dos processos de fabrico aditivo, tornaram este projeto mais interessante.

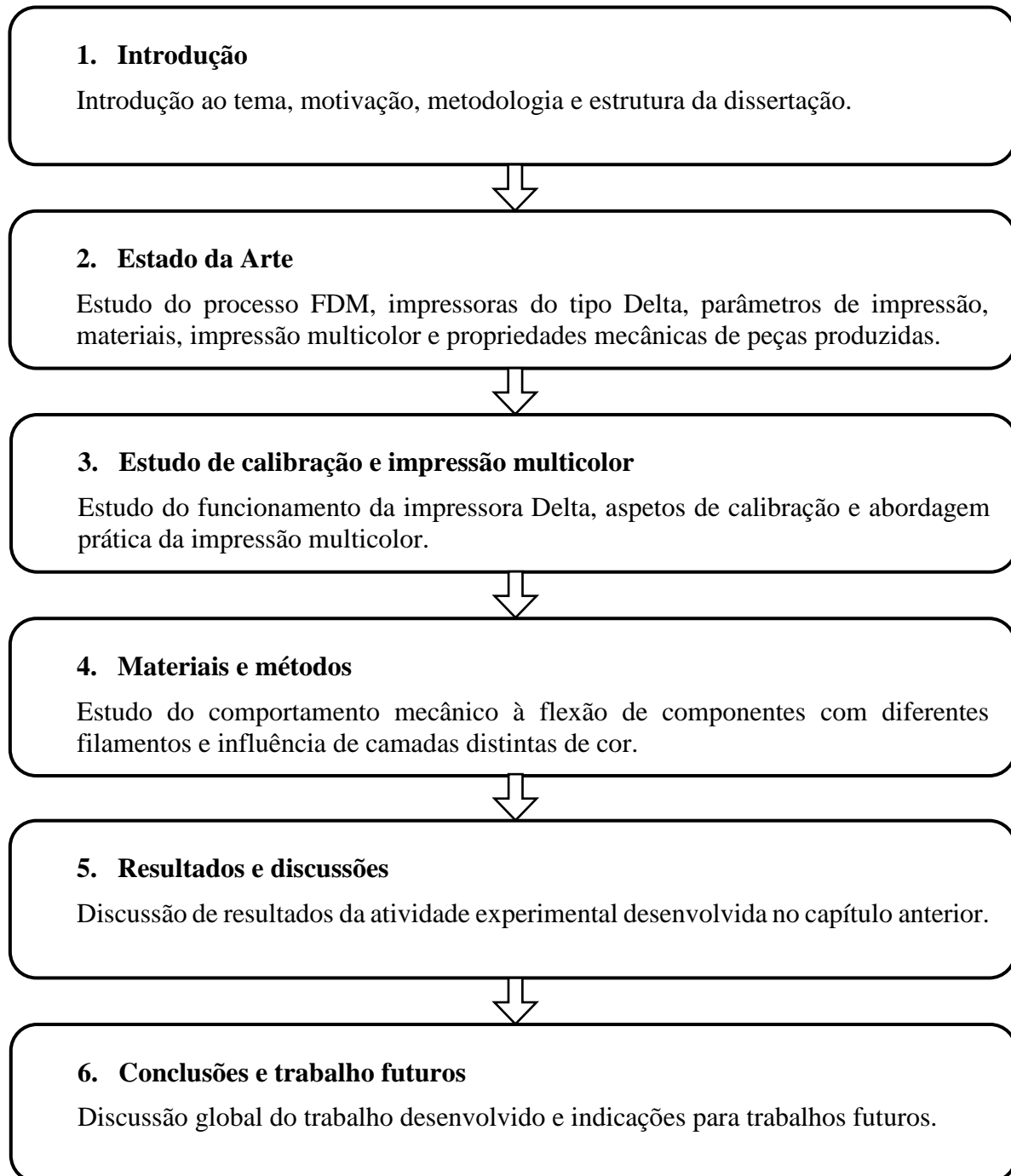
## **1.3 Objetivos do projeto**

- Estudo do funcionamento de uma impressora de modelação por extrusão de plástico de geometria delta;
- Estudo da impressão 3D multicolor;
- Estudo das propriedades mecânicas de componentes fabricados por diferentes camadas de cor.

## **1.4 Metodologia**

Neste trabalho começou por fazer-se um estudo do processo de FDM, impressoras de geometria Delta, aspetos de funcionamento e calibração, estudo da impressão com alimentação de múltiplos filamentos e, por fim, análise do comportamento mecânico de peças multicolores.

## 1.5 Estrutura da dissertação



## 2 Estado da arte

### 2.1 Fabrico Aditivo

A impressão 3D é o processo de fabrico aditivo (FA) que permite construir objetos sólidos a partir de modelos 3D digitais. O processo é conseguido pela deposição de sucessivas camadas de material até se obter o modelo pretendido. De uma maneira geral, o procedimento passa pela criação de um modelo tridimensional CAD, de seguida utiliza-se um *software* para fazer o *slicing*<sup>1</sup> (divisão em fatias) do modelo e por fim a sua construção, camada a camada, por deposição sucessiva de material (Figura 1) [1].



Figura 1 – Processo de Fabrico Aditivo.

Segundo a norma ASTM F2792 [2], os processos de FA estão divididos em sete categorias:

- *Binder jetting* – processo de FA onde um líquido de ligação é seletivamente depositado para a união de material em pó;
- *Directed energy deposition* – processo de FA onde energia térmica é utilizada para fundir materiais à medida que vão sendo depositados;
- *Material extrusion* – processo de FA onde material é seletivamente depositado por um bico ou orifício;
- *Material jetting* – processo de FA onde gotículas de material de construção são depositados seletivamente;
- *Powder bed fusion* – processo de FA onde energia térmica seletivamente funde regiões de uma base de pó;
- *Sheet lamination* – processo de FA onde camadas de material são coladas para formarem um objeto;
- *Vat photopolymerization* – processo de FA onde fotopolímero líquido em uma cuba é seletivamente curado por polimerização ativada por luz.

O processo de *Fused Deposition Modeling* (FDM), único processo abordado nesta dissertação, encontra-se incluso nos processos de *material extrusion*.

### 2.2 Processo de FDM

O processo de modelação por extrusão de plástico (FDM), também conhecido por *Fused Filament Fabrication* (FFF), é um processo de fabrico aditivo que consiste na extrusão de filamento de material termoplástico fundido, desenvolvido por S. Scott Crump para a *Stratasys* na década de 80 do século passado [3]. Contudo, com a expiração da patente do processo detida

<sup>1</sup> Devido à falta de terminologia estabelecida na língua portuguesa, ao abordar questões relacionadas com o Fabrico Aditivo é frequente o recurso à terminologia inglesa.

por esta, levou ao aparecimento em massa de impressoras 3D de baixo custo, tendo por base a filosofia *open source*, ou seja, a partilha de código aberto, assente no espírito de comunidade e partilha.

Segundo o esquema da Figura 2, o material termoplástico, na forma de filamento, enrolado em bobinas (2) é controlado por engrenagens, atravessando o bico extrusor (3), que se encontra a uma temperatura que permita a sua fusão, movimentando-se a uma velocidade estabelecida, fazendo a sua movimentação usando coordenadas cartesianas (nos eixos X, Y e Z) e depositando o material (5) numa base (1), que após arrefecimento, permite a geração de modelos 3D físicos, com base em modelos 3D digitais.

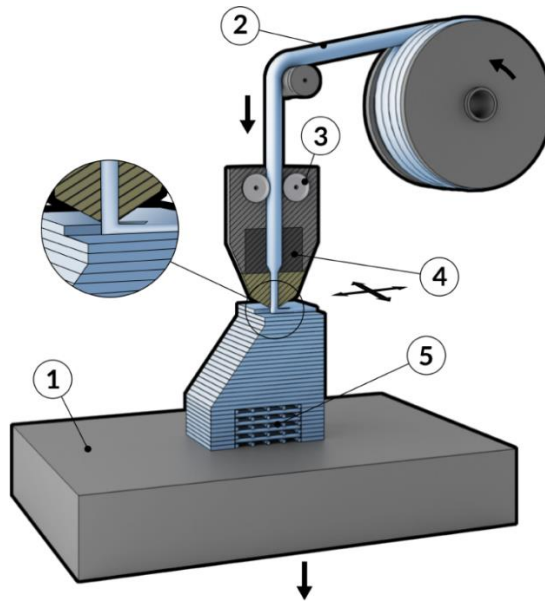


Figura 2 – Processo de FDM [4].

As principais etapas do processo estão esquematizadas na Figura 3.

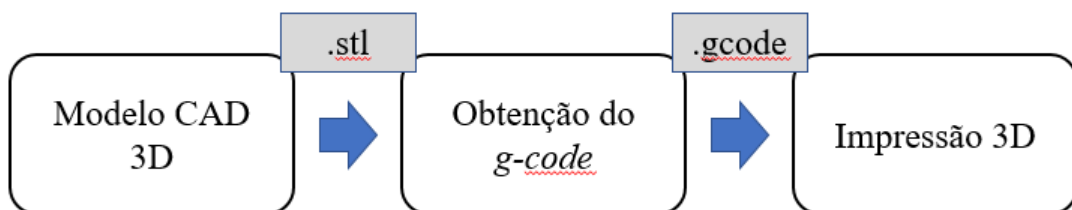


Figura 3 - Etapas da impressão 3D. Adaptado de [3].

Inicialmente, é necessário desenvolver, ou fazer o levantamento de forma com um *scanner* de um modelo 3D, utilizando um *software* de CAD, ou então obtendo um modelo de um repositório de ficheiros CAD (*Thingiverse*, *Grabcad*, *Myminifactory*) e convertê-lo num ficheiro STL ou AMF [5].

O *g-code* é uma linguagem de programação que permite o controlo da máquina, embora tendo comandos distintos para as impressoras 3D, é em tudo semelhante ao utilizado nas máquinas CNC. A criação do *g-code* é obtida por um programa de *slicing* (*Repetier Host*, *Slic3r*, *Cura*, *Simplify3D*).



## 2.3 Impressora 3D de geometria Delta

Estas impressoras, assim como as cartesianas, usam coordenadas cartesianas para efetuarem a movimentação. Porém, a principal diferença está na forma como é feita a movimentação: enquanto nas cartesianas para se fazer um movimento horizontal, é possível movimentar apenas um só eixo; na impressora Delta qualquer movimento horizontal, representa a movimentação conjugada dos três eixos. Outro aspeto distinto relaciona-se com a geometria no volume de impressão que nas cartesianas geralmente é cúbica e nas de geometria Delta é cilíndrica. O ponto de origem nas coordenadas é também diferente, sendo nas cartesianas numa extremidade da mesa e na Delta, a origem encontra-se no centro da base de impressão. Na Figura 4 apresenta-se um esquema dos principais elementos de uma impressora Delta.

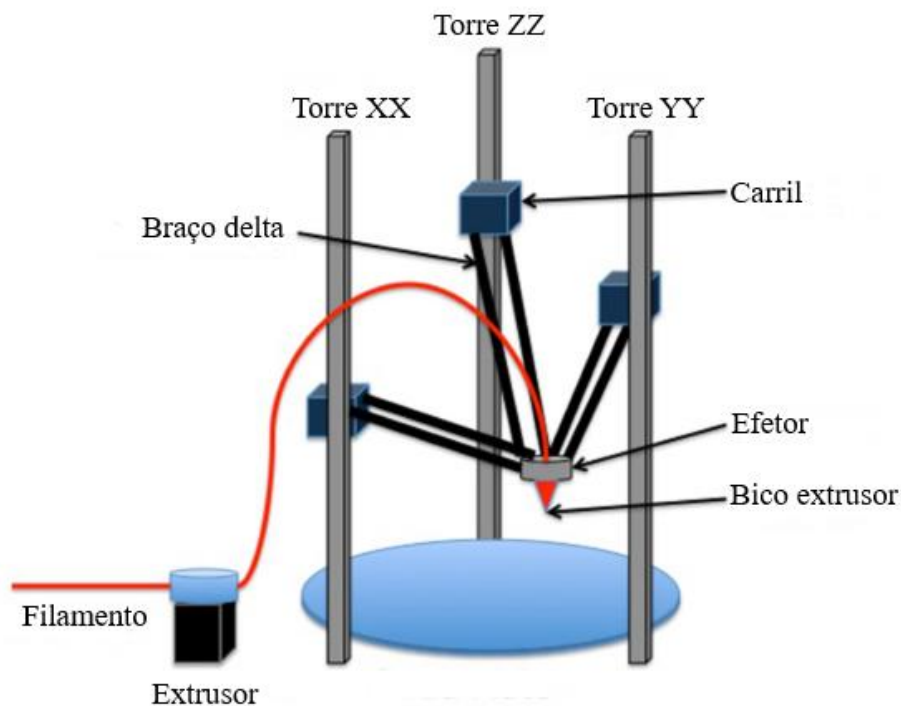


Figura 4 - Máquina de geometria Delta. Adaptado de [3].

No mercado é possível encontrar-se algumas impressoras de geometria Delta com capacidade de impressão multicolor.

A *DreamMaker Overlord Pro* (Figura 5) é uma impressora Delta com um único extrusor, embora seja considerada uma impressora multimaterial, pois o *software* permite a pausa automática para troca de filamento durante a impressão, possibilitando o fabrico de peças de multicoloridas [6].



Figura 5 - Impressora Delta *DreamMaker Overlord Pro* [6].

Outro exemplo são os modelos *HE3D K200* e *K280 DUAL EXTRUDER* [7]. São impressoras Delta com extrusor duplo *E3D Chimera* [8] com possibilidade para impressão com um ou dois filamentos.

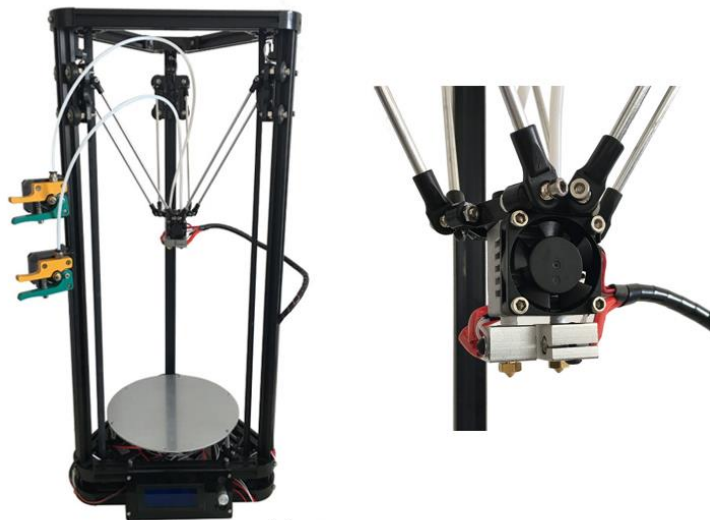


Figura 6 - *HE3D K200 DUAL EXTRUDER* [7].

Como é possível observar na Figura 7, a impressora *Geeetech Rostock 301* [9], com capacidade para impressão com três filamentos em simultâneo, equipada com um extrusor *Diamond hotend*.

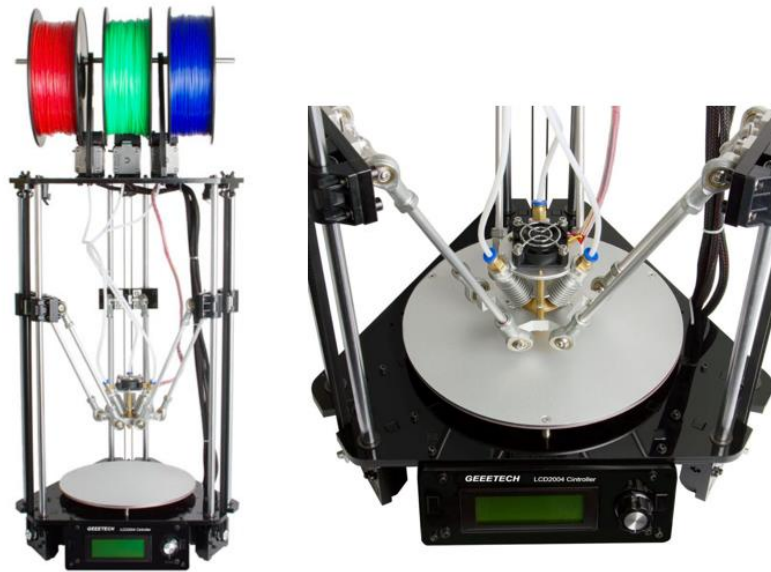


Figura 7 - Impressora *Geeetech Rostock 301* com *Diamond hotend* [9].

## 2.4 Impressão com múltiplas cores

Embora a oferta de soluções multimaterial no processo de FDM seja relativamente recente, atualmente já existem várias configurações disponíveis no mercado. Neste capítulo serão abordadas as configurações principais existentes.

### 2.4.1 Múltiplos Extrusores

O modelo mais frequente nas impressoras multimaterial consiste na utilização de extrusores duplos. Em termos gerais, os dois extrusores simples estão acoplados um ao outro e tanto surgem na configuração de alimentação direta<sup>2</sup> de filamento como de *bowden*<sup>3</sup>. Na Figura 8 está presente um exemplo de extrusor duplo.



Figura 8 - Extrusores duplos [10].

---

<sup>2</sup> O extrusor encontra-se por cima do bico extrusor alimentando diretamente o filamento.

<sup>3</sup> Nos sistemas *bowden* (arco), o extrusor encontra-se fixo fora da área de impressão, sendo o filamento alimentado por um tubo de PTFE. Isso faz com que haja uma redução de peso e permite impressões a maior velocidade, no entanto à custa de um sistema mais complexo.

A principal vantagem é permitirem um controlo distinto de temperatura dos dois extrusores, possibilitando o uso de diferentes materiais. Frequentemente é utilizado material de suporte solúvel (PVA ou HIPS) num extrusor e o material de construção noutra. Têm como principal desvantagem a necessidade de uma correta calibração do *offset* entre bicos extrusores para se garantir o perfeito alinhamento dos filamentos de diferente material, na construção de peças. A dificuldade de garantir esse alinhamento também dificulta na operação de nivelção da base de impressão, no caso de um bico se encontrar mais elevado que o outro. Outro inconveniente traduz-se na redução da área de impressão quando comparado com a utilização de extrusor único. Na Figura 9 podem observar-se duas peças fabricadas numa impressora com múltiplo extrusor. Na peça do lado esquerdo, é possível verificar a presença de artefactos de material que foram extrudidos involuntariamente do bico, que não em uso, sendo depositados na peça. Este é um problema comum nas soluções com múltiplo extrusor.

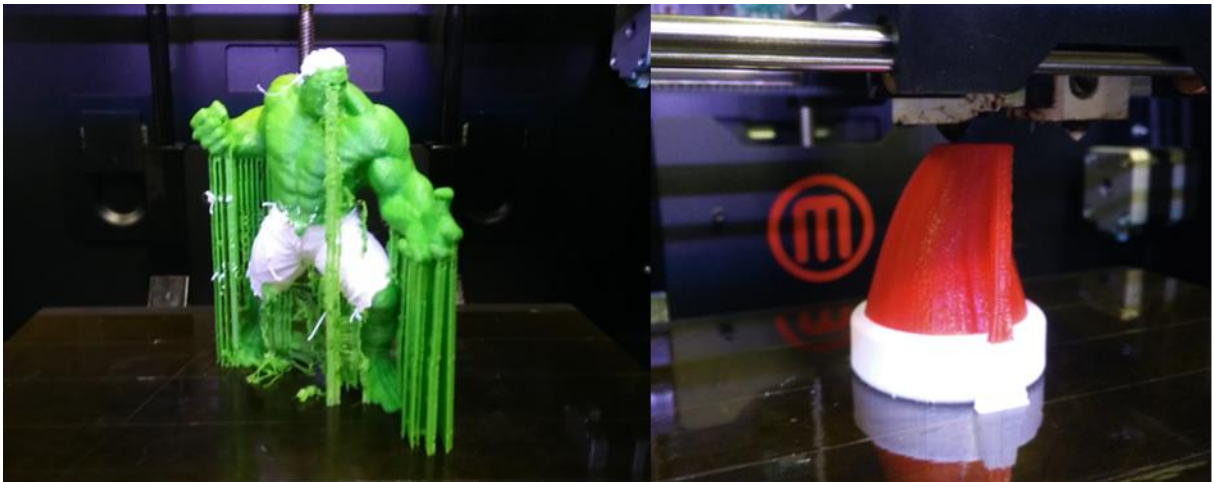


Figura 9 - Exemplos de peças fabricadas com extrusor duplo.

#### 2.4.2 Bico extrusor único

##### *Cyclops*

O *Cyclops* é um extrusor com bico único e alimentação de dois filamentos desenvolvido pela *E3D* [11]. É uma solução compacta, e como possui um único bico não incorre em problemas de desalinhamento como os extrusores duplos, no entanto não permite o controlo diferenciado de temperaturas. Possuindo um orifício com alimentação dupla, possibilita a mistura de filamentos. Na Figura 10 é possível observar o extrusor *E3D Cyclops*.

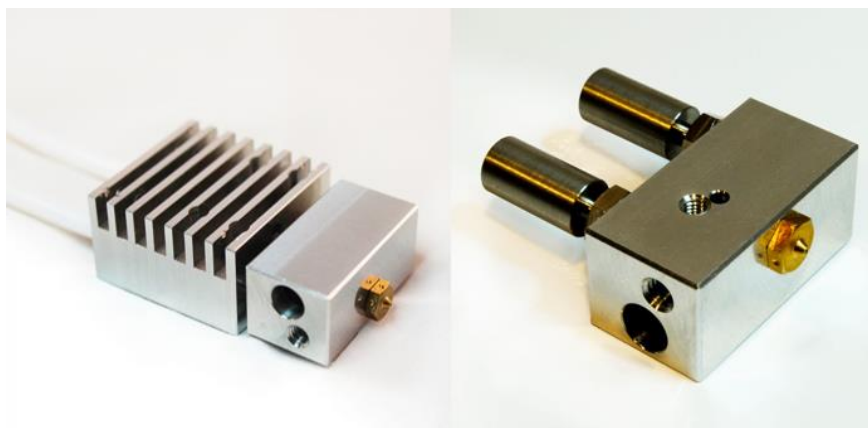


Figura 10 - Bico extrusor *E3D Cyclops* [11].

### ***Diamond hotend***

O *Diamond hotend* é um extrusor desenvolvido pela *RepRap* com a característica de possuir um único bico extrusor de 0,4 mm e alimentação de três filamentos [12]. Assim como o *Cyclops*, embora sejam considerados extrusores multimaterial, como só é possível o controle de um valor para a temperatura de extrusão, os filamentos em uso têm de ser do mesmo material ou terem a mesma gama de temperatura de fusão [13]. Possui uma câmara de mistura reduzida, possibilitando uma troca mais rápida de filamento, evitando desperdício de material.

Os principais elementos do *Diamond hotend* estão representados na Figura 11.

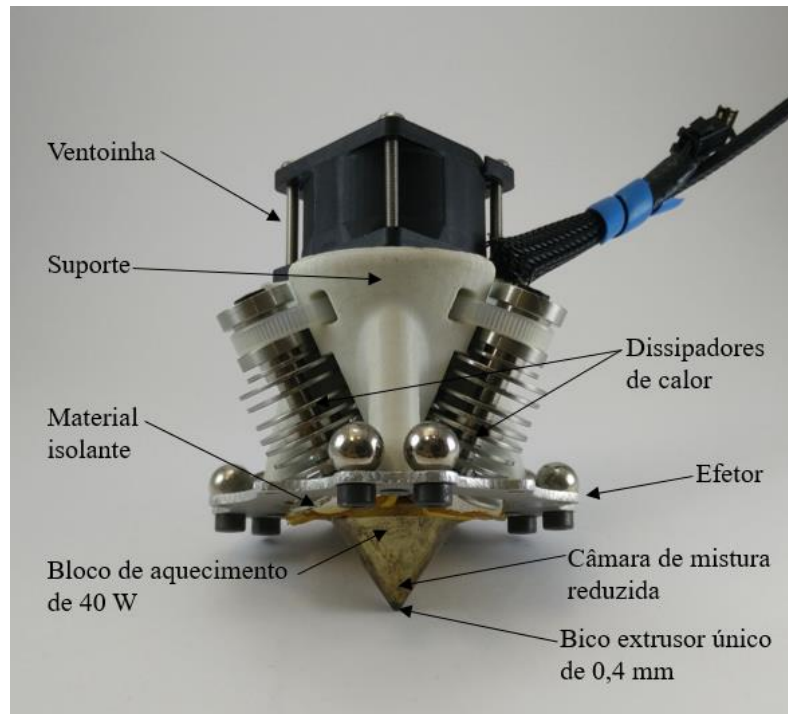


Figura 11 - Elementos do *Diamond hotend*.

Na Figura 12 estão presentes algumas peças produzidas com o extrusor do tipo *Diamond*.



Figura 12 - Peças impressas com o *Diamond hotend* [14].

Este extrusor será o elemento de estudo ao longo desta dissertação e será abordado mais em detalhe ao longo do Capítulo 3.



### 2.4.3 Palette+

O *Palette+* é um equipamento desenvolvido pela *Mosaic Manufacturing* [15] que permite a criação de modelos multicolores utilizando uma impressora com extrusor único, de forma automática, sem usar técnicas como fazer pausas durante a impressão para trocar filamento [16]. Permite combinar vários materiais como, PLA com material de suporte solúvel, ou PLA com material flexível, criando objetos multimaterial até um total de quatro materiais num só objeto. O equipamento e algumas peças produzidas pelo *Palette+* podem ser observados na Figura 13.



Figura 13 – Equipamento *Palette+* e peças fabricadas [15].

A Figura 14 apresenta um esquema com as etapas de funcionamento do equipamento.

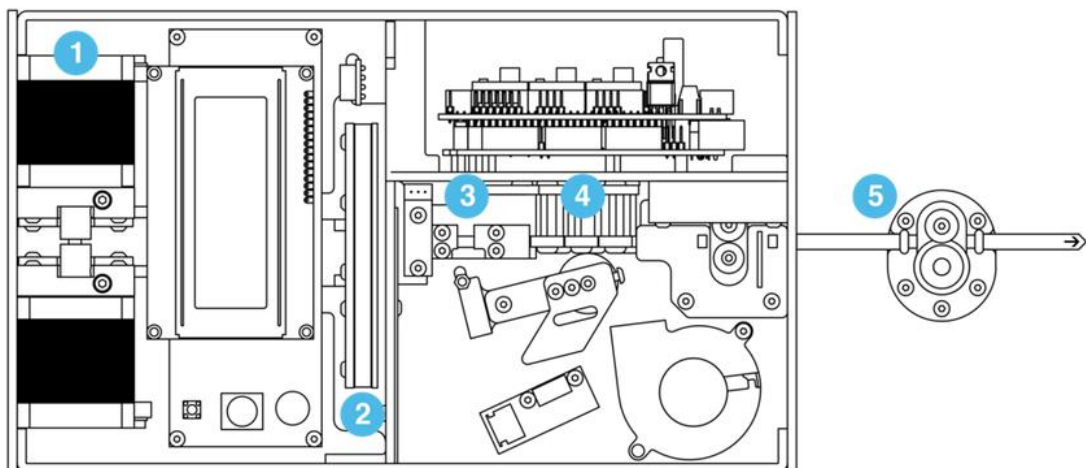


Figura 14 - Esquema de funcionamento do *Palette+* [15].

O funcionamento consiste nas seguintes etapas:

- **1. Condução** –um mecanismo semelhante ao da alimentação de filamento das impressoras FDM, controla a quantidade de cada filamento a ser alimentado na entrada;
- **2. Corte** - um sistema de corte rotativo corta o filamento assegurando um corte limpo e de baixa resistência;

- **3. Conexão** - conecta os filamentos de ponta a ponta antes de passá-los através de um canal de PTFE fazendo a junção deles;
- **4. Arrefecimento** - sistemas de arrefecimento, endurecem o filamento que foi unido, garantindo que mantém as dimensões corretas antes de ser alimentado na impressora;
- **5. Calibração** - monitoriza e ajusta continuamente os filamentos, permitindo que modifique os comprimentos do filamento de modo a garantir uma calibração perfeita.

Após a criação do *g-code* de um objeto multimaterial nos *softwares Simplify3D* ou *Cura*, o *software Chroma*<sup>4</sup> calcula as porções de filamentos a cortar e unir, necessários para a peça que se pretende imprimir.

O resultado é um filamento único com múltiplos pedaços de diferentes materiais como se observa na Figura 15.

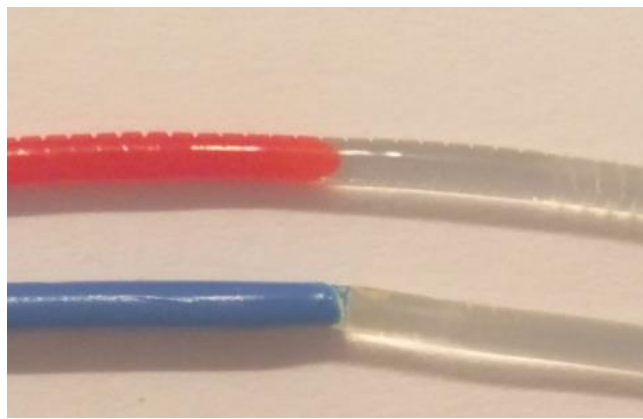


Figura 15 - União de filamentos pelo *Palette+* [15].

Possibilitando a criação de modelos como os da Figura 16, onde num objeto se encontram combinados PLA, TPU e PETG.



Figura 16 - Exemplos de peças com diferentes materiais fabricadas no *Palette+* [15].

---

<sup>4</sup> <https://www.mosaicmanufacturing.com/blogs/news/introducing-chroma-3>

## 2.5 Softwares de slicing e controlo

Como referido anteriormente, no processo de FA, a primeira etapa consiste na criação de um modelo 3D que depois de exportado para um ficheiro STL é convertido em *g-code*, para posteriormente ser construído camada a camada. A criação de *g-code* é realizada num *software* CAM, onde se definem os parâmetros de impressão, para posterior envio e interpretação pela impressora. Esses *softwares* CAM são designados de *slicers*, por terem a função de transformar o modelo STL num modelo em camadas. Além da capacidade de *slicing*, muitos programas, também permitem realizar operações de controlo da máquina, seja por interface de controlo, ou pelo envio direto de *g-code*. Sendo que o processo de FDM tem muito por base o *open source*, a maioria dos *softwares* CAM são de distribuição gratuita. A Tabela 1 apresenta alguns *softwares* CAM disponíveis.

Tabela 1 - *Softwares* CAM e de controlo.

<i>Software</i>	CAM	Controlo	Nível utilizador	Custo	Sistema Operativo
<i>Cura</i>	Sim	Não	Iniciante	Livre	PC, Mac, Linux
<i>CraftWare</i>	Sim	Sim	Iniciante	Livre	PC, Mac
<i>MatterControl</i>	Sim	Sim	Iniciante	Livre/Pago	PC, Mac, Linux
<i>Octoprint</i>	Sim	Sim	Intermédio	Livre	PC, Mac, Linux
<i>Pronterface</i>	Não	Sim	Intermédio	Livre	PC, Mac, Linux
<i>Repetier Host</i> <sup>5</sup>	Sim	Sim	Intermédio	Livre/Pago	PC, Mac, Linux
<i>Slic3r</i>	Sim	Não	Profissional	Livre	PC, Mac, Linux
<i>Simplify 3D</i>	Sim	Sim	Professional	Pago	PC, Mac, Linux

## 2.6 Materiais

Os filamentos para o processo de FDM estão disponíveis nos mais variados materiais e cores, normalmente com os diâmetros de 1,75 e 3,00 mm. Os tipos mais comuns são os termoplásticos Ácido Polilático (PLA) e o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). No entanto existem outros materiais como o Policarbonato (PC), PET, Nylon, PETG ou PVA. A Tabela 2 resume os materiais enunciados e outros, também utilizados no FDM, e algumas das suas características.

<sup>5</sup> O *Repetier Host* permite operações de controlo e CAM, no entanto o *slicing* é realizado no *Slic3r* que está integrado com o *software*.



Tabela 2 - Propriedades de materiais para impressão 3D. Adaptado de [17].

Material	Abreviatura	T <sub>m</sub> (°C)	Descrição
Polycarbonato	PC	155	Resistente ao impacto. Transparente
Poliamida	Nylon	220	Baixo atrito.
Poliestireno de alto impacto	HIPS	180	Semelhante ao ABS mas pode ser dissolvido. Usado usualmente como suporte
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	ABS	215	Flexível, fácil de moldar.
Polietileno Teraftalato	PET	210	Completamente reciclável.
Polietileno Teraftalato modificado com Glicol	PETG	230	Durável, resistente ao impacto.
Acetato de polivinilo	PVA	200	Dissolve-se em água quente. Usado como material de suporte
<i>Laywood</i> - Acetato de polivinilo com partículas de madeira	PVA	180	Mistura de madeira. Semelhante ao PLA.
Ácido Polilático	PLA	160	Derivado de plantas e biodegradável.

T<sub>m</sub> representa a temperatura de fusão do material.

Na presente dissertação, o material em estudo será o PLA. É o filamento mais utilizado na impressão 3D, sendo um material biodegradável e de baixo custo<sup>6</sup>. É também o material com maior facilidade para impressão, tendo no arrefecimento uma contração reduzida, não necessitando de um ambiente aquecido (como o ABS), podendo por isso ser impresso à temperatura ambiente. Na Tabela 3, podem ser encontradas algumas propriedades do PLA.

Tabela 3 - Propriedades do PLA. Adaptado de [18].

Propriedade	Valor
Módulo de Elasticidade (MPa)	3000 – 4000
Tensão máxima (MPa)	50 – 70
Extensão na rotura (%)	2 – 10
Tensão máxima à flexão (MPa)	100
Modulo de elasticidade à flexão (MPa)	4000 – 5000
T <sub>g</sub> (°C)	60-70
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,24 – 1,26

<sup>6</sup> O custo médio de filamento ronda os 20 €/kg.

## 2.7 Parâmetros de impressão e propriedades mecânicas

Os parâmetros de impressão definem todo o processo de construção, tendo influência no resultado final dos modelos obtidos por FDM. Os principais parâmetros do processo são seguidamente apresentados.

**Altura de camada** – define a altura dos filamentos nas camadas depositadas. Um valor mais baixo permitirá uma maior resolução dos objetos produzidos e melhor acomodação das camadas. Um valor maior possibilitará tempos de impressão mais curtos. Tal é dependente da largura do bico extrusor.

**Largura de camada** – define a largura do filamento na camada. O seu valor é múltiplo da largura do bico.

**Ângulo de impressão** – define a trajetória que o bico extrusor faz ao longo da base de impressão. Tipicamente movimento retilíneo (a), nos ângulos  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$ , ou então outro tipo de trajetórias como as presentes na Figura 17.

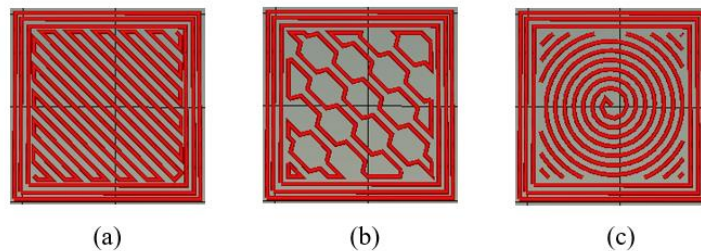


Figura 17 - Ângulos de impressão (a) retilíneo (b) *honeycomb* (c) *Archimedes*.

**Orientação de construção** – define o ângulo que a peça faz com a base de construção. Devido à natureza tipicamente anisotrópica dos componentes fabricados por FDM, terá influência na resistência mecânica das peças [19].

**Preenchimento** - define a densidade de material no espaço interno de uma peça. É definido em termos de percentagem. Maior preenchimento, aumenta a resistência mecânica dos componentes, à custa de maiores tempos de impressão e gasto de material. A Figura 18 demonstra a influência do preenchimento na estrutura interna das peças.

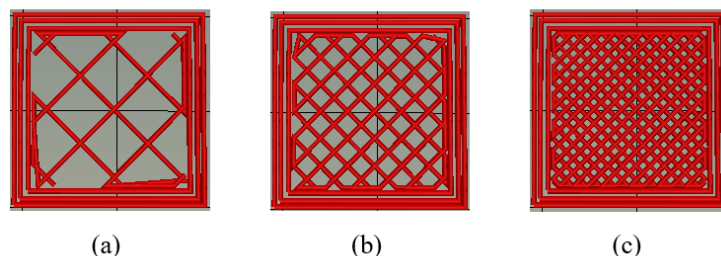


Figura 18 - Preenchimento nas percentagens (a) 20 % (b) 50 % e (c) 100 %.

**Velocidade de impressão** – é a velocidade que o extrusor atinge durante os movimentos de deposição de material. Nos *softwares* CAM são geralmente definidos diferentes valores de velocidade de acordo com a fase de impressão (velocidade na primeira camada, nos perímetros ou no preenchimento). Segundo Yuan [20], as velocidades de impressão influenciam a taxa de material extrudido depositado.

**Temperatura de extrusão** - é a temperatura que o bico extrusor precisa de se encontrar durante o processo de impressão. O valor de temperatura será em função das características do material utilizado [20]

**Fluxo de material** – representa a quantidade de material que é extrudido. O controle deste parâmetro é fundamental para a qualidade das peças. O fluxo de material é controlado pelo multiplicador de extrusão e tem influência na qualidade dimensional das peças obtidas [21].

**Retração** – é o movimento de recuo do filamento durante uma fase sem extrusão. É necessário referir que o movimento de retração, não permite a retração do material presente no bico extrusor, pois esse material já se encontra num estado de fusão, mas alivia a pressão do filamento, evitando extrusão involuntária. Nos extrusores multimaterial de bico único, este é um parâmetro com elevada influência no controlo da mistura indesejável de cores e na rapidez da troca de ferramenta.

### 2.7.1 Propriedades mecânicas

Como referido anteriormente, as peças produzidas por FDM, são objetos produzidos camada a camada por deposição de filamento polimérico. Segundo Sun *et al.* [22] a ligação entre os filamentos nas camadas é dependente da energia térmica do material extrudido e da largura do pescoço formado entre filamentos, tal como observado na Figura 19.

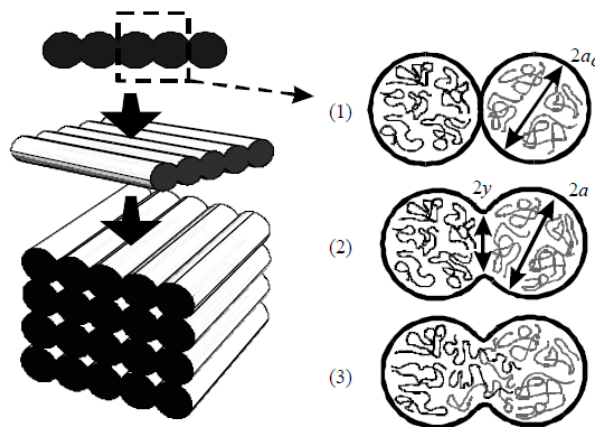


Figura 19 - Ligação entre filamentos. Adaptado de [22].

Os autores realizaram ensaios de flexão, em diversos pontos de uma base aquecida, que se encontrava com variações de temperatura. Os resultados obtidos demonstram variabilidade das propriedades mecânicas, havendo uma relação direta entre temperatura e resistência mecânica. A qualidade da união entre os filamentos é um fator importante na determinação da integridade das peças produzidas. Segundo Bellini [23], a temperatura de extrusão tem uma forte influência na união entre os filamentos.

Sendo que o processo de FDM consiste na deposição de filamentos que formam espaços vazios entre si, Bellini e Güçeri [24], referem a influência da orientação e o ângulo de impressão nas propriedades mecânicas dos materiais, mostrando a tendência anisotrópica das peças fabricadas por modelação por extrusão.

No FDM, podem ocorrer falhas na deposição de material. Segundo Weeren *et al.* [25] os defeitos podem surgir pelo processo (problemas com parâmetros de impressão, *hardware*, *software*) e/ou pelas características dos materiais. Essas falhas podem originar defeitos superficiais ou internos. Os defeitos superficiais podem ser do tipo efeito de escada, provocado pelo processo de *slicing*, formando patamares na deposição dos filamentos. Este problema pode ser atenuado utilizando valores mais reduzidos de altura de camada. Os defeitos internos, por

seu turno, são tipicamente originados por inconsistência na deposição dos filamentos, provocando falhas de deposição. Segundo Bellini *et al.* [26], os problemas de falha de deposição são frequentemente provocados por escorregamento do filamento nas engrenagens de alimentação.

### 2.7.2 Influência da cor nas propriedades dos materiais

Além dos parâmetros de processo, nos últimos anos estudaram-se os efeitos da utilização de materiais com diferentes tonalidades na qualidade de peças obtidas por FDM.

Tymrak *et al.* [27] estudaram a resistência mecânica por ensaios de tração de peças em ABS e PLA, produzidos por impressoras FDM de baixo custo com diferentes cores. Os resultados demonstraram variações nos valores de resistência à tração dentro do mesmo material.

Mais tarde, Wittbridt e Pearce [28] analisaram a percentagem de cristalinidade e resistência mecânica de PLA em cinco cores distintas (branco, preto, azul, cinza e natural). Os resultados demonstraram que a cor teve influência na percentagem de cristalinidade. O PLA natural (sem pigmento) apresentou reduzida percentagem de cristalinidade, tendo uma estrutura molecular do tipo amorfa<sup>7</sup>. O PLA branco obteve os maiores resultados de cristalinidade. Existiu relação entre cristalinidade e resistência mecânica, mas não existindo uma relação direta entre o arranjo da estrutura molecular e a resistência mecânica. A resistência mecânica mostrou também relação com a temperatura de fusão que é dependente da percentagem de cristalinidade.

Santana *et al.* [30] avaliaram a composição química de filamentos de PLA. Os resultados da análise térmica mostraram também variação da estrutura molecular que terá influência na temperatura ideal de extrusão, embora os filamentos apresentem uma composição química semelhante entre si. Santana [31] avaliou a resistência mecânica de peças em PLA natural e amarelo, que apresentaram valores de resistência mecânica semelhantes.

Kim *et al.* [32] estudaram as propriedades mecânicas de amostras multimaterial, com combinação de PLA e ABS utilizando uma impressora de extrusor duplo. Os resultados mostraram dependência da posição relativa entre camadas, tendo como influência a utilização de um extrusor duplo que devido *offset* entre extrusores, anteriormente referido, provocou problemas de união na transição entre materiais.

A falta de regulamentação na forma como os materiais são produzidos e dos pigmentos utilizados, traz influência nas propriedades dos materiais, que irão variar de acordo como os filamentos são produzidos. Isto faz com que seja necessário a caracterização dos materiais para se obterem as soluções ótimas de processo. Este aspeto é de principal relevância na utilização de um extrusor do tipo *Diamond hotend* onde não é possível diferenciar a temperatura de extrusão para os três filamentos, que dificultará a obtenção de uma temperatura ideal de extrusão para todo os materiais.

---

<sup>7</sup> Os polímeros amorfos não apresentam, ao invés dos polímeros semicristalinos que apresentam uma porção cristalina e outra amorfa, tendo definidos uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e temperatura de fusão ( $T_m$ ), uma  $T_m$  definida [29].

## 2.8 Impressora delta do LDPS

A presente dissertação tem por base a utilização de uma impressora Delta (Figura 20) presente no LDPS. Foi desenvolvida por Abreu [33, 34] em 2017 e posteriormente otimizada por Regadas [35] no âmbito das suas dissertações de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. É uma máquina Delta com um extrusor do tipo *Diamond* como o referido no Capítulo 2.4.2, tendo capacidade para a impressão com a alimentação simultânea de três filamentos. A impressora Delta está presente na Figura 20.

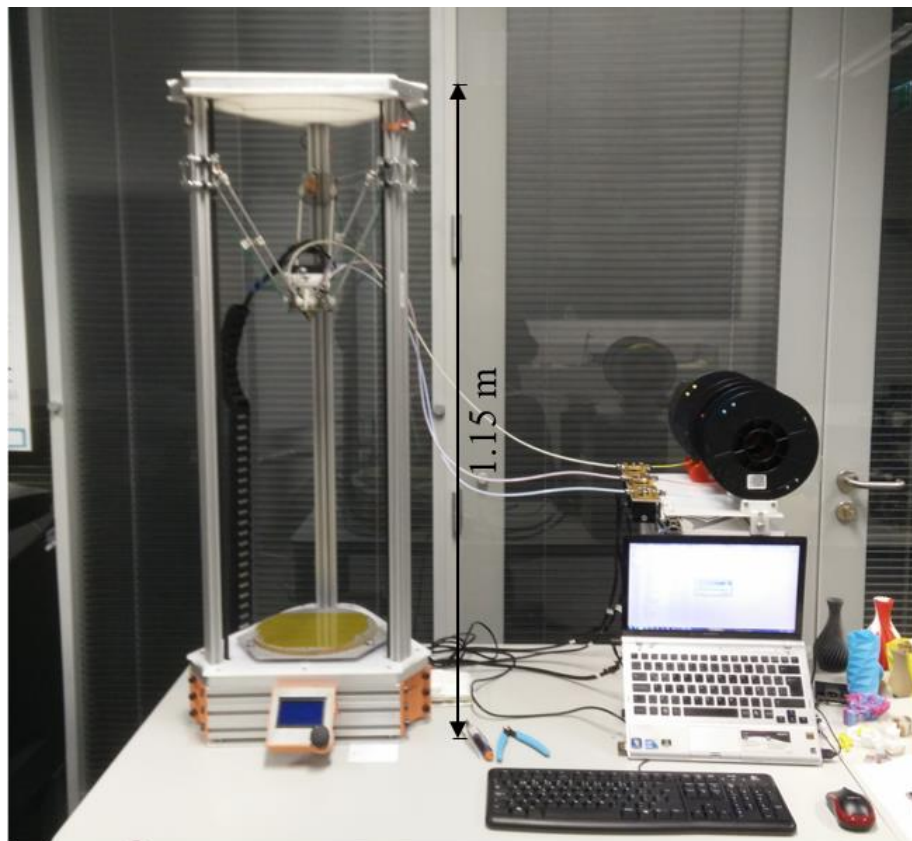


Figura 20 - Impressora delta do LDPS.

As principais características da máquina delta estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - *Softwares e hardwares* da impressora delta.

<i>Software/Hardware</i>	<b>Descrição</b>
<i>Software</i> de interface	<i>Repetier Host v1.0.5</i>
<i>Firmware</i>	<i>Marlin 1.1.0 RC7</i>
Arduino	Mega 2560
Placa de expansão	<i>Ramps 1.4</i>
Motores de passo-a-passo	<i>Nema 17</i>
<i>Drivers</i> dos motores de passo-a-passo da movimentação	A4988
<i>Drivers</i> dos motores de passo-a-passo da alimentação de filamento	DVR8825
Bico extrusor	<i>Diamond hotend</i>
Base aquecida	<i>PCB Heatbed MK3ALU</i>
Sensores de temperatura	Termistor NTC 100 k $\Omega$
Volume de impressão	$\varnothing$ 200 x 600 mm

### 3 Impressora Delta - Estudo de calibração e impressão multicolor

Esta dissertação apresenta-se como a continuação dos trabalhos realizados em anos anteriores de desenvolvimento de uma impressora FDM do tipo delta, para servir o LDPS. Os aspetos construtivos foram abordados no trabalho realizado por Abreu [33], e posteriormente o trabalho de otimização para possibilitar a impressão com múltiplos filamentos foi desenvolvido por Regadas [35].

Assim, sendo, os aspetos puramente construtivos da máquina não serão aqui abordados, devendo para o efeito, o leitor recorrer aos trabalhos anteriormente citados. Esta dissertação pretende assim, abordar o funcionamento e estudo da impressão de cor, no entanto, serão referidas algumas alterações que se revelaram necessárias no decurso da sua utilização. Para uma experiência satisfatória de utilização deste tipo de máquina (e nas impressoras FDM de baixo custo em geral) é essencial uma correta calibração. Este capítulo resulta da experiência obtida ao longo do período de estudo da dissertação, abordando-se os tópicos essenciais para uma calibração e bom funcionamento da máquina. Nesse sentido, a calibração encontra-se dividida em três partes:

- Calibração da movimentação;
- Calibração da alimentação de filamento;
- *Diamond hotend* e temperaturas.

Durante o processo de calibração deu-se preferência ao programa de interface *Pronterface* para o controlo da movimentação da máquina. Foi também necessário realizar algumas alterações ao *firmware*.

Após a parte concernente à calibração, são abordados aspetos relacionados com a impressão. Nessa situação recorreu-se à utilização do *software Repetier Host* e do pós-processador *Slic3r*. Foram testados os parâmetros ideais e realizou-se o fabrico de peças que demonstram a capacidade de impressão da impressora Delta em estudo. Para finalizar esta fase de estudo de funcionamento, para fins de *benchmarking*, procedeu-se ao fabrico de algumas peças de teste sugeridas pela revista *MAKE* [36].

#### 3.1 Calibração da movimentação

##### 3.1.1 Nivelção da base

Durante a utilização do equipamento, a operação de calibração mais decorrente será sempre garantir a nivelção da base de impressão. Garantir que se obtém uma correta distância do bico extrusor em toda a área da base de impressão é obrigatório para se obter uma boa deposição e adesão da primeira camada de filamento, que será crucial para o sucesso de qualquer impressão. É normal após um certo número de impressões ter de se repetir esta operação. Se não ocorrerem mais falhas, ou então se porventura houver necessidade de desmontar o bico extrusor, esta será a única calibração que se repetirá com frequência.

Esta operação consiste em:

- Nivelar a base de impressão;
- Verificar o *offset* dos *endstop* das torres dos efetores.

As etapas referidas estão representadas na Figura 21.



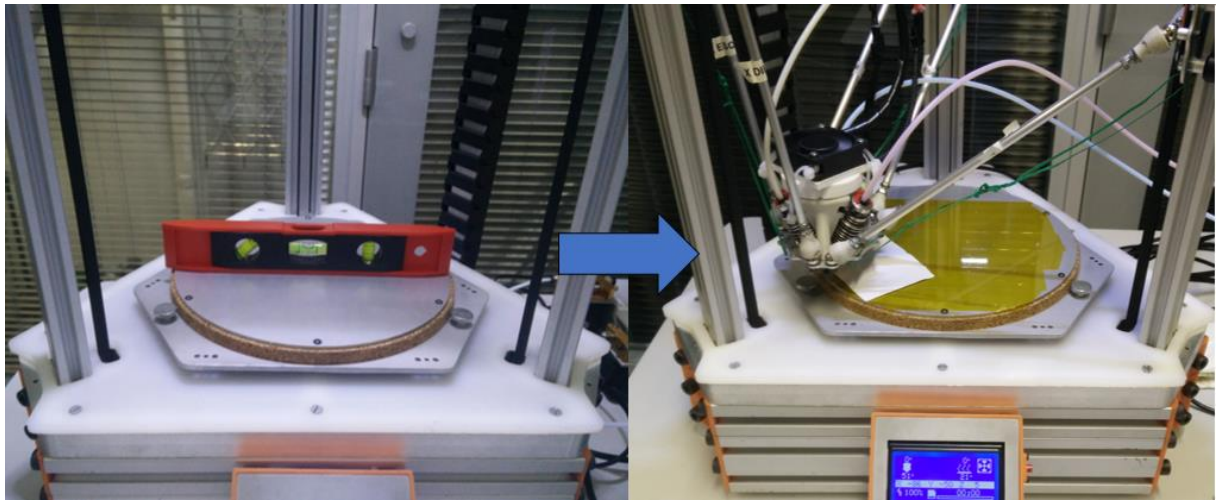


Figura 21 - Etapas de nivelção da base.

A nivelção da base pode ser obtida com recurso a uma bolha de nível, regulando os três parafusos de ajuste presentes na base aquecida. É necessário obter a nivelção em todas as direções da superfície da base. É preciso também ter em atenção que a nivelção deve ser feita em relação à estrutura da máquina e não à superfície em que a máquina está instalada.

A outra etapa é determinar a compensação dos fins-de-curso presentes nas torres de movimentação da máquina. Para tal, é necessário verificar a compensação em três pontos próximos das torres XX, YY e ZZ, os pontos A, B e C presentes na Figura 22

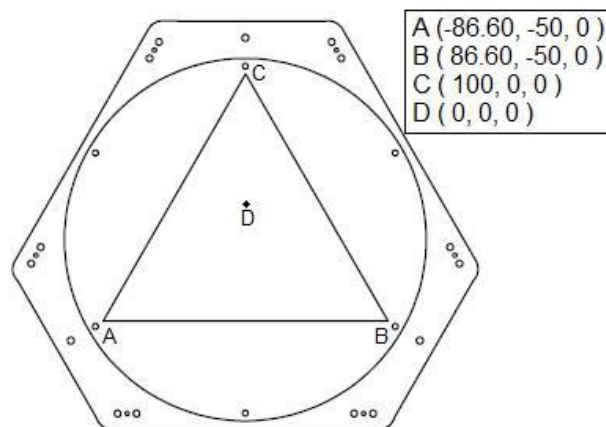


Figura 22 - Pontos de calibração [35].

Utilizando o programa *Pronterface* pode-se fazer este processo, iterativo, executando os seguintes comandos:

- M501 – Fazer a leitura dos *offsets* de fim-de-curso iniciais;
- G28 – Movimentação para a posição zero da máquina;
- G1 – Movimentação para um ponto de calibração;
- M114 – Leitura da posição;
- M666 – Comunicação do novo offset de fim-de-curso;
- M500 – Guardar valores obtidos.



De uma forma mais detalhada, o primeiro passo será executar o comando M501 para se obter a informação registada da compensação de fim-de-curso inicial (por exemplo X-7.50 Y-7.70 Z-8.60). Começa-se por movimentar o extrusor para a posição zero da máquina. De seguida, movimenta-se o extrusor para o primeiro ponto, neste caso A, o mais próximo da torre XX a uma distância vertical ligeiramente acima da base de impressão. Utilizando os comandos de movimentação do *Pronterface*, faz-se uma aproximação lenta à mesa. O objetivo será obter uma posição próxima de 0,1 mm entre o bico extrusor e a mesa. Uma técnica frequentemente utilizada é o recurso a uma folha de papel (que terá aproximadamente<sup>8</sup> 0,101±0,01 mm de espessura), fazendo-se a aproximação, passando a folha entre o bico e a base, até se sentir uma ligeira restrição ao seu movimento. É então executado o comando M114 para obter a leitura da posição do bico e, comparando o valor do eixo Z com os valores iniciais, comunica-se o novo valor de compensação de fim-de-curso pelo comando M666. De seguida, repete-se o processo para o ponto B e por fim para o ponto C. Este processo, deve ser repetido no mínimo duas vezes e por fim, terminado o processo iterativo, faz-se a movimentação do bico para o centro da mesa (Ponto D). No Ponto X0 Y0 Z0, deve-se também encontrar uma distância entre o bico e a base de aproximadamente 0.1 mm. No caso de após as várias iterações isso não suceder, estar-se-á perante um problema como o descrito no capítulo 3.1.2.

### 3.1.2 Cinemática inversa delta

Nas impressoras cartesianas é possível efetuar uma movimentação qualquer, fazendo só a movimentação num dos eixos X, Y ou Z. No caso das impressoras Delta, um movimento num dos eixos, representa sempre o movimento linear conjugado dos carris presentes nas torres XX, YY e ZZ. Isto leva a abordar um conceito de planeza do movimento do bico extrusor. As principais relações geométricas estão descritas na Figura 23/Figura 1.

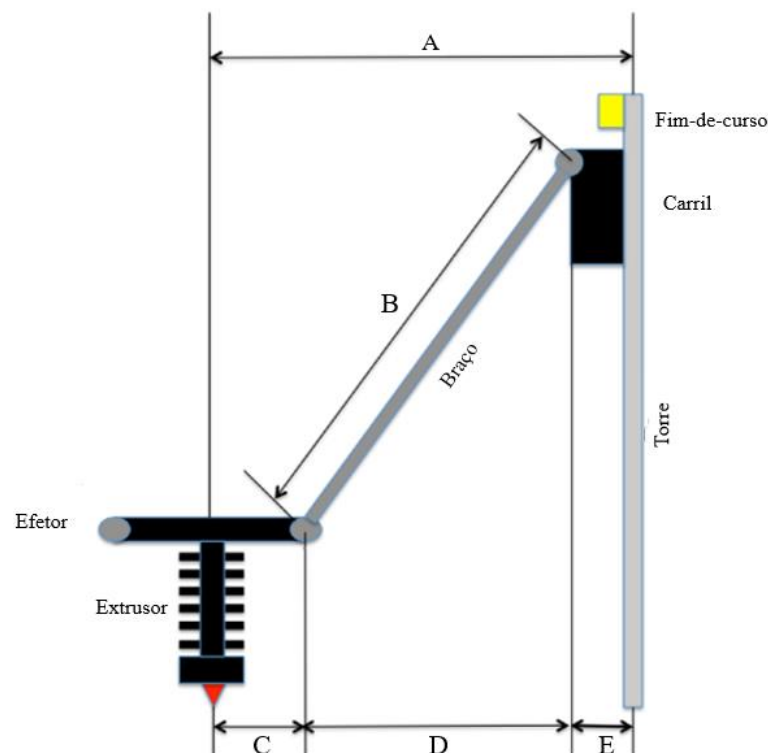


Figura 23 - Relações geométricas delta. Adaptado de [3].

<sup>8</sup> Medido em papel de impressora comum de 80 g/m<sup>2</sup>.

A relações geométricas necessárias no *Marlin* estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Relações geométricas delta no *Marlin firmware*. Adaptado de [3].

#	Descrição	#definição em <i>Configuration.h</i>
A	Distância entre o centro do carril e o centro do efetor	DELTA_SMOOTH_ROD_OFFSET
B	Comprimento do braço medido do centro da rótula	DELTA_DIAGONAL_ROD
C	Distância do centro da rótula ao centro do efetor	DELTA_EFFECTOR_OFFSET
D	Distância calculada ( $A - C - E$ )	DELTA_RADIUS
E	Distância do centro do carril ao centro da rótula do braço	DELTA_CARRIAGE_OFFSET

Numa primeira fase estes valores serão medidos fisicamente, mas posteriormente é necessário verificar a trajetória que o bico extrusor faz sobre a base de impressão. Um valor demasiado elevado do parâmetro *DELTA\_SMOOTH\_ROD\_OFFSET* fará com que o bico tenha um movimento convexo sobre a base. Um valor baixo causará um movimento côncavo (Figura 24). Portanto, na fase de calibração da base referida no capítulo 3.1.1, uma distância irregular do extrusor no centro poderá indiciar a necessidade de ajuste deste parâmetro.

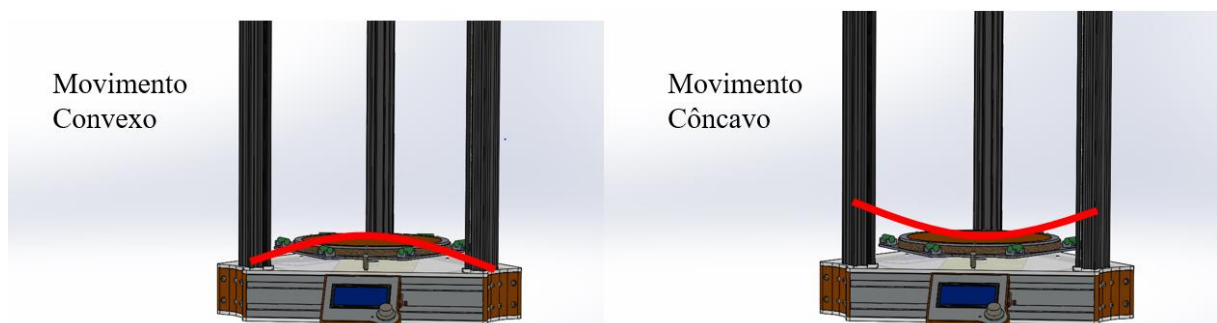


Figura 24 - Movimentos convexo e côncavo do extrusor.

Este é um processo iterativo e de avaliação visual, sendo necessário inspecionar a distância do bico à mesa, ajustando o parâmetro até que essa distância se mantenha em horizontal em qualquer trajetória. Para ajustar o parâmetro este é modificado diretamente no *firmware*<sup>9</sup>, ou pode ser alterado via interface *Pronterface* com o comando M665 ajustando o valor de *DELTA\_RADIUS*, que após as verificações ficou em definido em 136,0 mm.

### 3.1.3 Calibração dos motores passo-a-passo da movimentação

É necessário assegurar que os microcontroladores (*drivers*) dos motores passo-a-passo fornecem a corrente correta para os motores. Uma baixa voltagem poderá causar a falha de passos, por outro lado, uma tensão alta provocará sobreaquecimento aos motores. A tensão de

<sup>9</sup> É preciso atentar que no caso de se utilizar a configuração de *EEPROM* ativa, as alterações nas configurações do *firmware*, só terão efeito após nova leitura e registo na memória temporária, utilizando o comando M502.

referência (VREF) é função da intensidade máxima e resistência elétrica, que são características do motor, calculando-se por:

$$VREF = \text{Intensidade máxima} * 8 * \text{Resistência [V]} \quad (3.1)$$

Sabendo o valor de tensão de referência, com recurso a um multímetro ajusta-se o valor de tensão entre o pino de GND<sup>10</sup> (-) e o potenciômetro (+), como representado na Figura 25. No caso específico da impressora delta, o valor pretendido<sup>11</sup> será de 0,48 V.

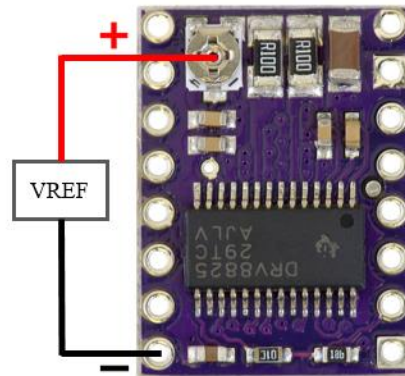


Figura 25 - Medição da tensão no *driver* DVR8825.

Para uma maior resolução de movimento é possível o controlo por *microstepping* pela combinação de ativação de *jumpers* na placa RAMPS. No caso dos motores do sistema de movimentação, a configuração é 1/32 que é possível pelas combinações da Tabela 6.

Tabela 6 - Combinação de *jumpers* do *driver* DVR8825.

<i>Microstepping</i>	<i>Jumper</i> MS1	<i>Jumper</i> MS2	<i>Jumper</i> MS3
1/32	1	0	1
1/32	0	1	1
1/32	1	1	1
0 – Não ativo			
1 – Ativo			

### 3.1.4 Verificação da calibração do movimento

Após as etapas de calibração da movimentação, fez-se a verificação do rigor construtivo e geométrico da impressora. Para tal, recorreu-se à impressão de uma peça de calibração [37]. Esta ferramenta permite detetar problemas construtivos de desalinhamento das torres dos efetores, diferenças de tamanho dos braços e verificar o rigor dimensional das peças impressas.

<sup>10</sup> GND do inglês *ground* significa massa ou negativo.

<sup>11</sup> Para uma intensidade máxima de 1,2 A e resistência de 0,05  $\Omega$ , características dos motores *NEMA 17* utilizados.

É possível observar a fase de impressão e as relações geométricas da peça de calibra na Figura 26.

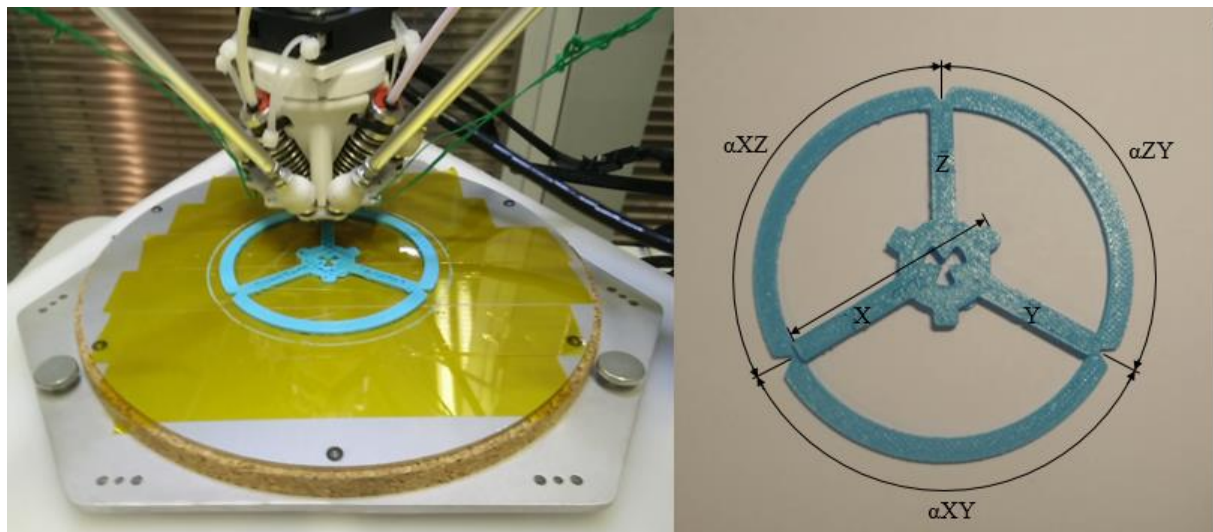


Figura 26 - Impressão da peça de calibração e relações geométricas.

Os resultados obtidos estão presentes na Tabela 7

Tabela 7 - Resultados da peça de calibração.

	Distância (mm)			Ângulo entre torres (°)		
	X	Y	Z	$\alpha_{XY}^{12}$	$\alpha_{XZ}$	$\alpha_{ZY}$
Valor teórico	60	60	60	120	120	120
Valor medido	59,95	60,02	60,01	120	120	120
Desvio (%)	-0,08	+0,03	+0,02	0	0	0

Dos resultados obtidos a primeira conclusão que se pode tirar é o comprovado rigor dimensional de construção da impressora delta com um ângulo correto de 120 ° entre torres. Da análise dimensional os resultados são satisfatórios com um erro dimensional máximo inferior a 0,1 %. Embora residuais, as diferenças dimensionais poderão estar relacionadas com ligeiras diferenças dos comprimentos dos braços do efetor.

### 3.2 Calibração da alimentação de filamento

No processo de FDM, material na forma de filamento é “empurrado”, pelos motores da alimentação ou extrusores, para atravessar um bico aquecido que irá fundir o material e posteriormente depositá-lo. É então necessário garantir que o bico se encontre a uma temperatura que permita a fusão do polímero (os aspetos relacionados com o bico e temperaturas serão abordados no tópico 3.3), e que os extrusores forneçam a quantidade correta

<sup>12</sup>  $\alpha_{XY}$  representa o ângulo entre a torre XX e a torre YY.

de filamento. Na Figura 27, é possível verificar em (a) as falhas de deposição de material, provocado pela falha de alimentação de filamento, fenómeno denominado de sob extrusão. No caso (b), de uma peça multicolor, verifica-se na camada inferior, novamente sob extrusão, no entanto na camada superior ocorreu a deposição excessiva de material, fenómeno de sobre extrusão.

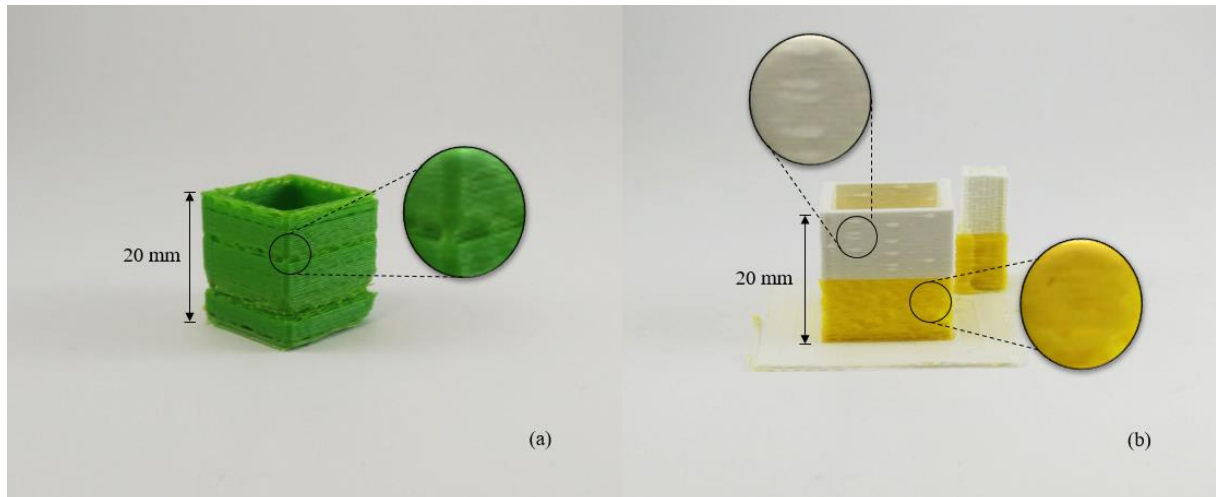


Figura 27 - Fenómenos de impressão Delta de (a) sob extrusão (b) sobre extrusão.

Estes fenómenos representam a necessidade de calibrar a alimentação de filamento, para não ocorrerem problemas relacionados com falta ou excesso de material depositado.

Além das notórias falhas ou excesso de material visíveis numa peça, uma maneira empírica de se observar uma incorreta calibração do fluxo de filamento, é possível ser observada na Figura 28, durante a extrusão livre de material. Num caso não calibrado (a), o filamento fundido normalmente assume uma curvatura ao sair do bico extrudido [38], sendo um bom indicador da necessidade de correção do fluxo. No caso (b) é possível ver o perfil retilíneo do filamento extrudido, perfil de uma correta calibração da alimentação de material.

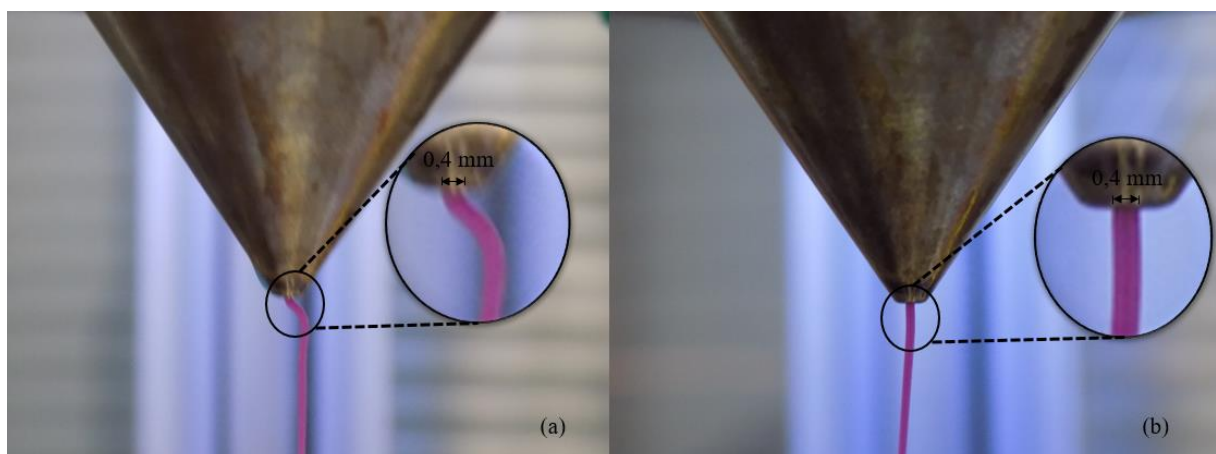


Figura 28 - Análise da extrusão livre de filamento (a) não calibrado (b) calibrado.

A calibração da alimentação de filamento é realizada em duas partes:

- Calibração dos motores passo-a-passo do módulo de extrusão;
- Calibração da alimentação no *firmware*.



### 3.2.1 Calibração dos motores do módulo extrusão

O processo de calibração dos motores de passo do módulo de extrusão é em tudo semelhante ao utilizado no módulo de movimentação. O ajuste da tensão de referência é feito segundo a Figura 29. Como os motores de passo-a-passo do módulo de extrusão são os mesmos modelos dos do módulo de movimentação, a tensão de referência é também igual a 0,48 V.

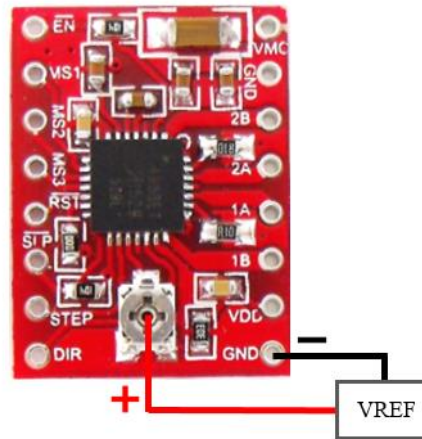


Figura 29 - Medição de tensão no *driver A4988*.

Na situação do ajuste para *microstepping* tem-se uma situação distinta. A placa RAMPS permite a ligação de cinco motores de passo, sendo que três são os destinados à movimentação dos três eixos e os restantes dois correspondem aos alimentadores de filamento 1 e 2 da máquina. A combinação de *microstepping* pela ativação de *jumpers*, neste caso 1/8 está representada na Tabela 8.

Tabela 8 - Combinação de *jumpers* do *driver A4988*.

<i>Microstepping</i>	<i>Jumper MS1</i>	<i>Jumper MS2</i>	<i>Jumper MS3</i>
1/8	1	1	0

O alimentador de filamento 3 é conectado a uma placa de extensão *Keyes Stepper motor* estando a configuração de *microstepping* presente na Figura 30.

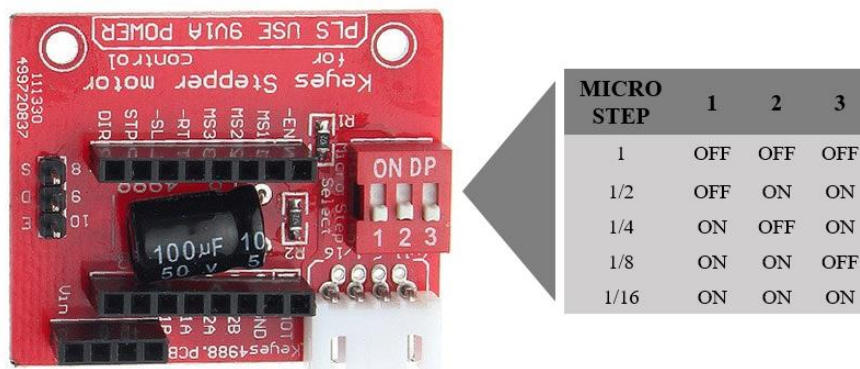


Figura 30 - Placa de extensão e configuração de *microstepping*.

### 3.2.2 Calibração da alimentação no *firmware*

Garantindo a calibração dos drivers dos motores passo-a-passo, é necessário que os alimentadores de filamento forneçam a quantidade correta de material. Para isso, sem que o filamento esteja a ser alimentado no bico extrusor, no *software* de controlo, envia-se um comando de extrusão de filamento. Esse valor é medido e em caso de necessidade é ajustado o valor de passos por mm dos extrusores de alimentação, nas definições do *firmware*. Executou-se o comando de alimentação de 100 mm de material e anotaram-se os valores obtidos em cada extrusor, Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de alimentação de filamento.

Alimentador	Comprimento obtido (mm)
Extrusor 1	101,54
Extrusor 2	101,07
Extrusor 3	101,75

No ficheiro *configuration.h* verificou-se o valor de passos/mm do extrusor, Figura 31.

```
// default settings
// delta speeds must be the same on xyz
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160, 160, 160, 48.35} // default steps per unit for Kossel (GT2, 20 tooth)
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {100, 100, 100, 25} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {2000,2000,2000,2000} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves.
```

Figura 31 - Definição de passos/mm no *firmware*.

O novo valor de passos/mm é calculado para o extrusor 1 por:

$$\text{Novo valor de passos/mm} = \frac{\text{Valor de passos/mm do } \textit{firmware} * 100}{\text{Valor medido de filamento}} \quad (3.1)$$

Tendo neste caso resultado num valor de 47,62 passos/mm. Este valor é então alterado no *firmware*, ou então gravado na *EEPROM* via interface do *software* de controlo. O ideal seria repetir este processo para os extrusores 1 e 2. No entanto, o *Marlin* só permite a definição de um valor de passos/mm que será utilizado para os três extrusores. A solução é calibrar para o primeiro extrusor, e os restantes serem ajustados de maneira dependente do valor calculado inicialmente, pelo ajuste nos parafusos da alimentação de filamento, Figura 32.

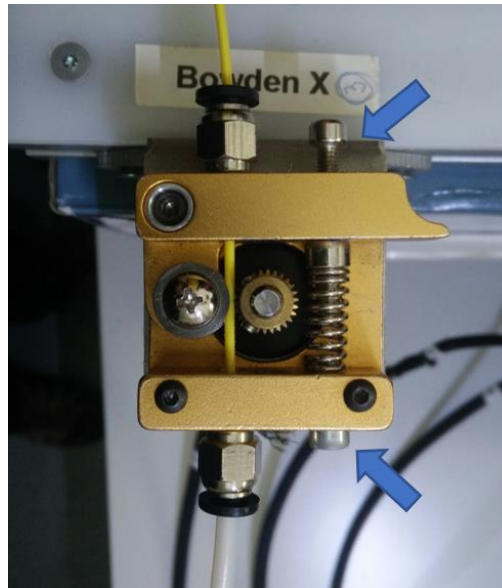


Figura 32 - Ajuste dos parafusos do extrusor.

Esta limitação do *firmware* dificulta o processo de calibração, dificultando também a obtenção de um valor exato de alimentação nos três alimentadores. No entanto, no final da calibração foi possível obter um valor de 100 mm nos três extrusores.

### 3.3 *Diamond hotend* e temperaturas

Como já referido, o *Diamond hotend* é um extrusor multimaterial com três entradas de filamento e um único orifício de saída. A alimentação é feita indiretamente por tubos de *bowden*, estando a alimentação de filamento numa unidade exterior à máquina. O funcionamento deste extrusor obriga a que seja necessário ter alguns aspetos em conta.

A primeira consideração é que neste tipo de extrusor, mesmo que só se pretenda fazer impressões com uma cor, é necessário que todas as entradas, estejam alimentadas com filamento, com o risco de o filamento a ser utilizado se escoar pelas entradas que não estão alimentadas, Figura 33.

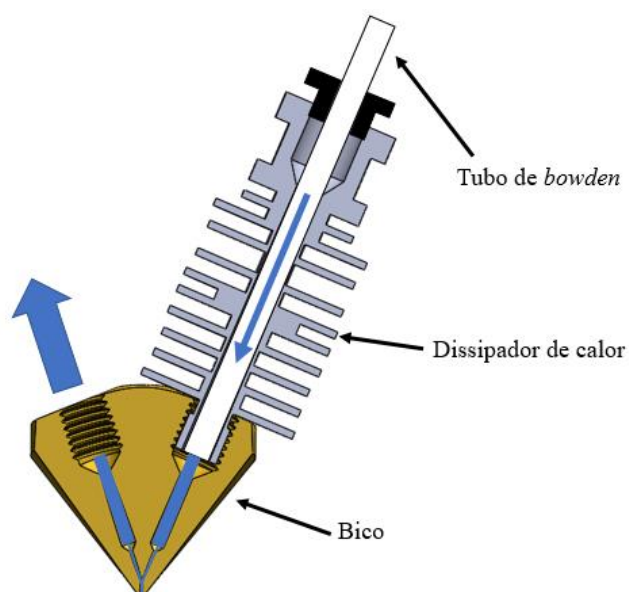


Figura 33 – Esquema do escoamento indevido de filamento no *Diamond hotend*.



Abordando a alimentação do filamento, o método utilizado foi o de, com o extrusor frio, alimentar os filamentos nas três entradas até se sentir resistência, significando que ele se encontra no canal de entrada do bico. Aquecer o bico a uma temperatura que permita a fusão do material alimentado, e pelo *software* de controlo, realizar a extrusão livre de filamento.

Numa fase inicial do trabalho, ocorreram problemas frequentes com a falta de extrusão e entupimentos recorrentes do *Diamond*. Estando os motores de passo-a-passo calibrados, concluiu-se que o problema estaria relacionado com a temperatura de extrusão. Com recurso a um termopar, mediram-se as temperaturas no interior do bico, no canal de entrada do filamento onde o material é inicialmente fundido, como demonstra a Figura 34.

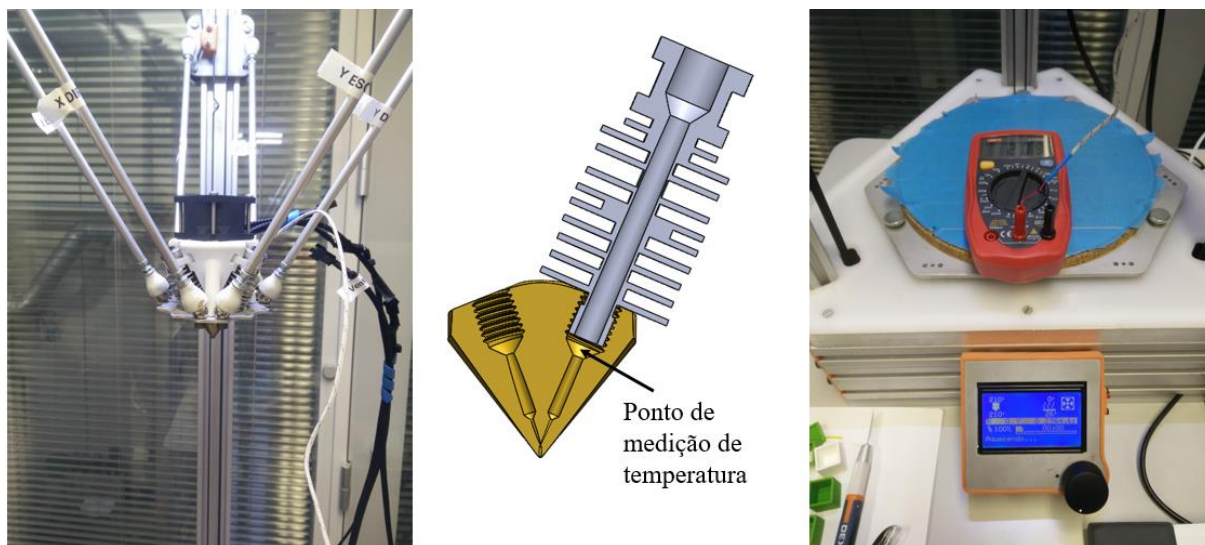


Figura 34 - Medição de temperatura no *Diamond hotend*.

Da medição de temperaturas, resultaram disparidades de temperaturas a rondar os 15°C, entre os valores medidos e os apresentados no LCD da impressora. Das possíveis causas, destacou-se a ventoinha de arrefecimento dos dissipadores de calor, que teria um caudal de ar superior ao do modelo de ventoinha recomendado pelo fabricante [12], causando o arrefecimento excessivo nos dissipadores de calor, provocando perturbação na temperatura do bico extrusor. Procedeu-se, então, à substituição da ventoinha. As características dos modelos, antigo e novo, estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Características das ventoinhas dos dissipadores de calor [39].

Ventoinha	Antiga	Nova
Marca	<i>Sunon</i>	<i>Sunon</i>
Modelo	PF40281B1	KDE1205PHB2
Dimensões (mm x mm x mm)	40 x 40 x 28	50 x 50 x 15
Tensão DC (V)	12	12
Potência (W)	6,12	0,9
Corrente (A)	0,51	0,08
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	41,82	22,08
Velocidade de rotação (rpm)	17600	4700
Ruído (dB)	58,8	30

É possível observar que o caudal de ar da ventoinha inicial era praticamente o dobro do modelo indicado pela *RepRap*.

Como se procedeu à alteração da ventoinha, foi necessário corrigir os valores de controlo PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) do termístor NTC do bico extrusor. O *Marlin* permite utilizar um modo automático de cálculo do valor de PID, executando o comando M303, em torno de uma temperatura de referência [40]. Utilizando o *Pronterface*, executou-se o comando M303 E0 S220 C6, executando seis ciclos de aproximação em torno da temperatura de 220 °C. Da calibração resultaram os valores:

- Kp: 39,12;
- Ki: 1,42;
- Kd: 268,52.

Estes valores foram salvos na *EEPROM*, utilizando o *Repetir Host*.

Após o ajuste do PID, repetiu-se a medição da Figura 34, dessa vez obtendo-se na medição de temperatura com o termopar, os valores apresentados no LCD.

Outro fator de influência para a ocorrência de entupimentos no bico extrusor, relacionou-se com a movimentação dos tubos de *bowden* dentro dos dissipadores de calor, Figura 35. O anel responsável por fixar o tubo de *bowden*, movia-se da posição de retenção, permitindo que o filamento, durante a fase de alimentação, movesse os tubos para fora do bico, criando uma zona com material, que arrefecendo e solidificando, bloqueava a alimentação de filamento.

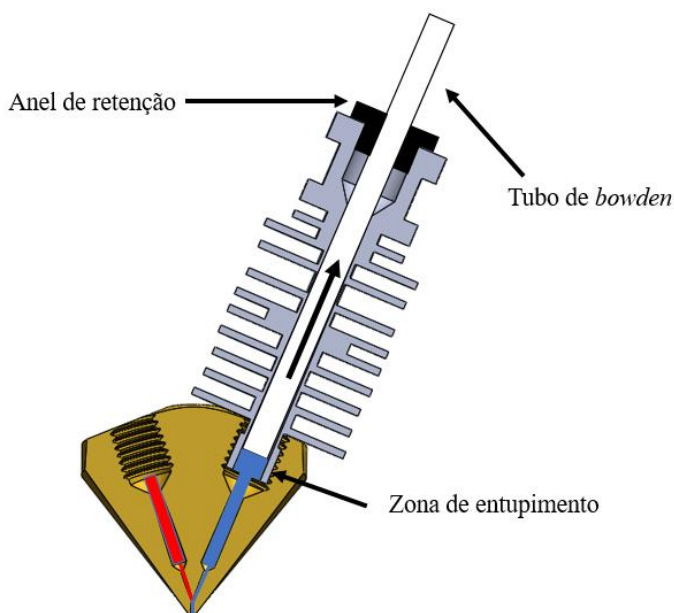


Figura 35 – Esquema de entupimento do *diamond hotend*.

Para contornar esta situação, fabricaram-se cliques para impedir que os anéis de retenção dos tubos se movessem. Também para garantir que os tubos entravam totalmente nos dissipadores de calor (53 mm), a sua montagem foi realizada antes de se enroscarem os dissipadores no *Diamond*, como pode ser observado na Figura 36.

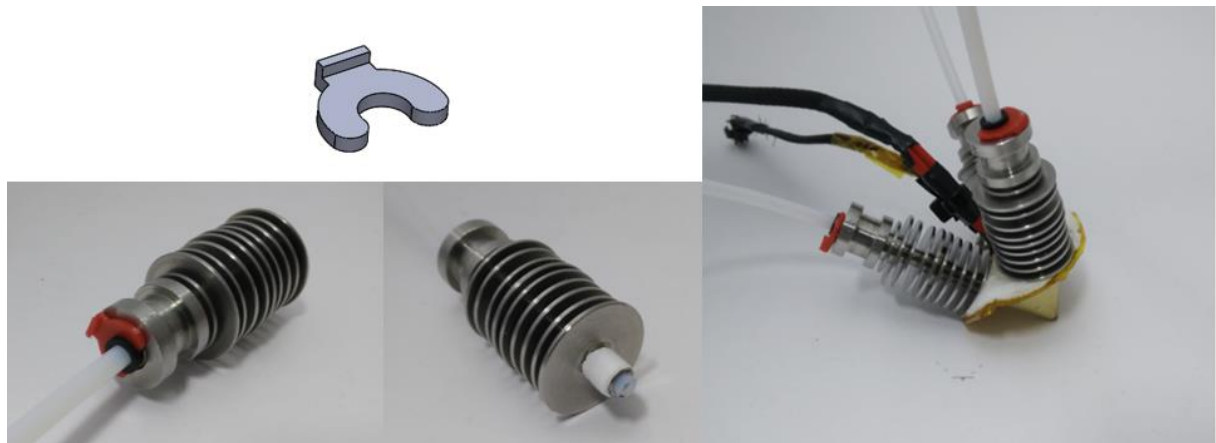


Figura 36 - Montagem dos tubos de *bowden*.

Deste modo, resolveram-se os problemas recorrentes de entupimento do *Diamond*. Numa medida preventiva, não estando as bobinas de filamentos protegidas num compartimento fechado, sujeitas à deposição de poeiras, imprimiram-se “filtros”, com esponja no interior, para reter possíveis resíduos presentes no filamento, antes de entrarem nos tubos de *bowden*, e serem causa de entupimentos no bico, que podem ser observados na Figura 37.

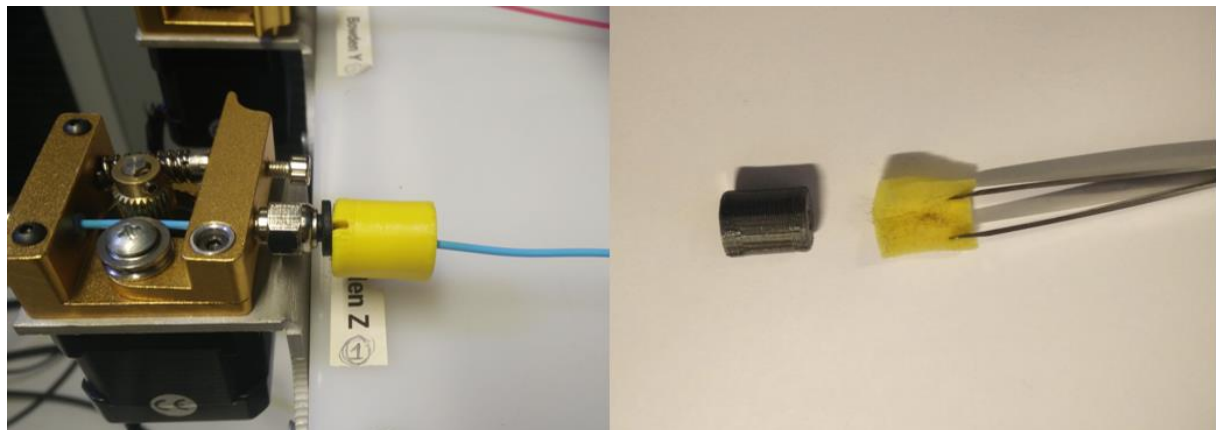


Figura 37 - Filtros do filamento.

Além da medição de temperaturas no extrusor, verificaram-se as temperaturas na base aquecida de impressão, aquecendo a base a uma temperatura de 70° C. Fazendo a verificação, o valor foi definido foi obtido do centro da base, mas à medida que se afastou da zona central, ocorreram variações de temperatura até próximo de 10 °C de diferença. Resultados idênticos foram observados por Silveira *et al* [41] referindo a influência da posição do termístor na mesa aquecida. Este fenómeno faz com que seja necessária especial atenção em construir os modelos no centro da mesa, para evitar problemas de desprendimento durante a impressão.

### 3.4 Impressão multicolor

#### 3.4.1 Retração de filamento

Para se obterem impressões com boa qualidade de acabamento, evitando deposições involuntárias nas superfícies exteriores dos modelos, o parâmetro com mais influência será a retração de filamento. No extrusor do tipo *Diamond* este parâmetro terá ainda mais influência, pois terá impacto na velocidade de troca de filamentos, que poderá resultar num atraso de alimentação e falha de deposição de material no início da deposição de uma nova cor. Num

extrusor multimaterial com bico único, terá também impacto direto na mistura indesejável de filamentos. Como referido anteriormente, a retração, não faz o recuo do filamento que está dentro do bico, pois esse material já se encontra num estado de fusão, mas sim alivia a pressão exercida no interior do extrusor, do material já fundido.

Na Figura 38 é possível observar o efeito direto da utilização ou não de retração. No caso (a) não foi utilizada qualquer retração sendo notório o efeito de *oozing*<sup>13</sup> na movimentação em vazio do bico extrusor entre as duas caixas. O aparecimento de *oozing* e *stringing*, Figura 39, pode ser também provocado por excesso de temperatura [42]. No caso (b) utilizando retração, observa-se a não ocorrência de extrusão de material nos movimentos em vazio.

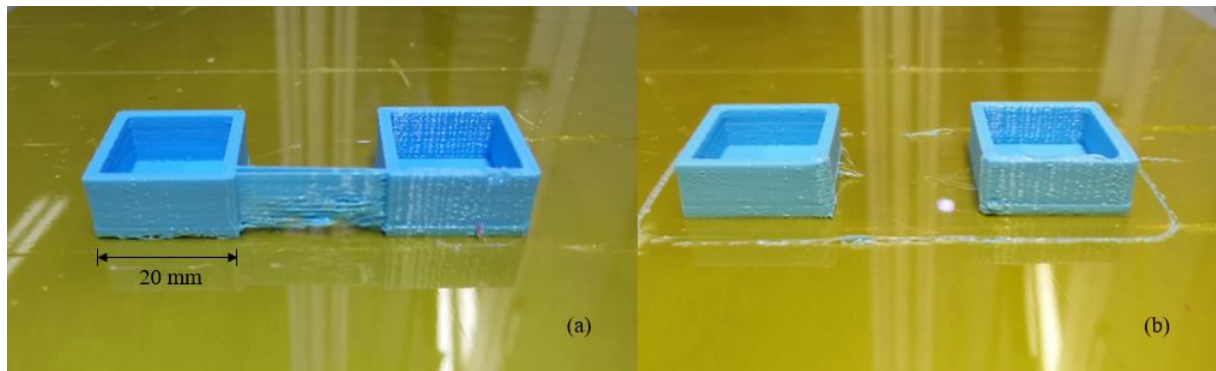


Figura 38 - Influência da retração (a) sem retração (b) com retração.



Figura 39 - Formação de *stringing*.

Essencialmente na retração controlam-se dois fatores:

- **Distância de retração:** representa quanto filamento é retraído no extrusor (mm);
- **Velocidade de retração:** representa quão rápido o filamento é retraído do extrusor (mm/s).

<sup>13</sup> Os termos *oozing* e *stringing* descrevem o aparecimento de artefactos de material, normalmente no formato de cordas, pela extrusão involuntária de plástico do bico extrusor em operações de movimentação.



Para lidar com a retração, o *firmware Marlin* permite a utilização de retração baseada no *firmware* [43]. Em vez das definições de retração serem definidas pelo programa de *slicing* escrevendo os movimentos no *g-code* sobre a forma de comandos E<sup>14</sup>, os movimentos de retração são apresentados por comandos G10 e G11, movimentos de retração e recuperação<sup>15</sup> respetivamente. Para a utilização de retração por *firmware*, é necessário ativar a opção *FWRETRACT* no ficheiro *Configuration\_adv.h* do *Marlin* (Figura 40).

```
// @section fwretract

// Firmware based and LCD controlled retract
// M207 and M208 can be used to define parameters for the retraction.
// The retraction can be called by the slicer using G10 and G11
// until then, intended retractions can be detected by moves that only extrude and the direction.
// the moves are then replaced by the firmware controlled ones.

#define FWRETRACT //ONLY PARTIALLY TESTED
#if ENABLED(FWRETRACT)
  #define MIN_RETRACT 0.1          //minimum extruded mm to accept a automatic gcode retraction attempt
  #define RETRACT_LENGTH 3         //default retract length (positive mm)
  #define RETRACT_LENGTH_SWAP 13   //default swap retract length (positive mm), for extruder change
  #define RETRACT_FEEDRATE 45      //default feedrate for retracting (mm/s)
  #define RETRACT_ZLIFT 0          //default retract Z-lift
  #define RETRACT_RECOVER_LENGTH 0 //default additional recover length (mm, added to retract length when recovering)
  #define RETRACT_RECOVER_LENGTH_SWAP 0 //default additional swap recover length (mm, added to retract length when recovering)
  #define RETRACT_RECOVER_FEEDRATE 8 //default feedrate for recovering from retraction (mm/s)
#endif
```

Figura 40 - Definição de retração por *firmware* no *Marlin*.

A principal vantagem é a possibilidade da utilização de comandos M207 para a retração e M208 para recuperação, permitindo fazer correções em tempo real durante uma impressão.

Para se obter parâmetros de retração satisfatórios, realizou-se um breve estudo de calibração utilizando a metodologia de Taguchi [44]. Foram avaliados dois fatores: distância de retração ( $D_r$ ) e velocidade de retração ( $V_r$ ), em três níveis para cada fator, como pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros e níveis de retração avaliados.

Parâmetros	Níveis		
Distância de Retração (mm)	3	5	7
Velocidade de retração (mm/s)	50	75	100

De acordo com o número de fatores e níveis, selecionou-se uma distribuição ortogonal de Taguchi do tipo L9 (Tabela 12), resultando em nove condições, tendo-se realizado uma amostra por cada condição.

<sup>14</sup> E representa um movimento efetuado pelo extrusor. Por exemplo: G1 E10 representa o comando de avanço de 10 mm de filamento.

<sup>15</sup> Recuperação é o processo de recuperação de alimentação do filamento que procede a uma operação de retração.

Tabela 12 - Condições do estudo de retração.

<b>Condição</b>	<b>Distância de retração (mm)</b>	<b>Velocidade de retração (mm/s)</b>
L1	3	50
L2	3	75
L3	3	100
L4	5	50
L5	5	75
L6	5	100
L7	7	50
L8	7	75
L9	7	100

Para o estudo imprimiram-se três torres de purga<sup>16</sup> com as dimensões 10 x 10 x 4 mm cada, a uma velocidade de impressão de 25 mm/s. Na análise avaliaram-se as massas obtidas, comparando com a massa teórica do objeto, com base na massa específica dos filamentos (calculada no Capítulo 5.1) e análise visual dos resultados.

Os resultados obtidos estão presentes na Figura 41.

<sup>16</sup> Torres de purga não são nada mais que modelos STL que são inseridos em conjunto com o modelo que se pretenda imprimir, sendo sacrificados com o objetivo de fazerem a limpeza do bico extrusor, antes de ele fazer a operação de deposição de material no modelo, evitando assim uma possível mistura de cores.

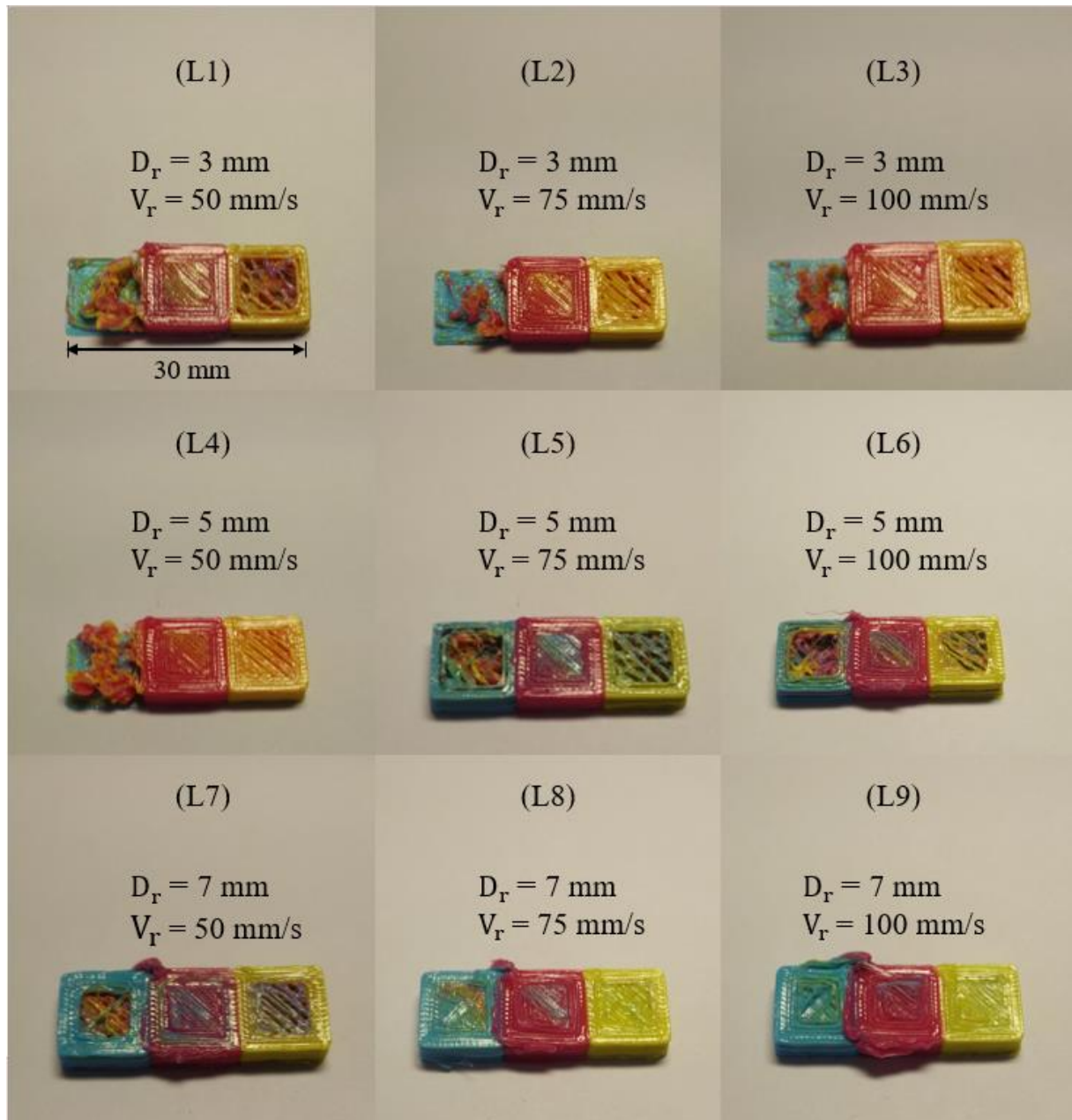


Figura 41 - Resultados do estudo de retração.

Os resultados de massa e comparação com valor teórico de massa<sup>17</sup> são apresentados na Tabela 13.

<sup>17</sup> O valor teórico para o total das três torres de purga, para uma massa específica de 1,25 g/cm<sup>3</sup> foi de 1,5 g.

Tabela 13 - Resultados de massa do estudo de retração.

Condição	Massa (g)	Desvio (%)
L1	0,995	-33,7
L2	1,030	-31,3
L3	0,895	-40,3
L4	1,090	-27,3
L5	1,180	-21,3
L6	1,210	-19,3
L7	1,475	-1,7
L8	1,555	3,7
L9	1,665	11,0

Nota: Desvio representa o erro percentual de massa em relação ao valor de massa teórico.

Dos resultados obtidos, é possível verificar que para o nível de retração mais baixo, após a primeira camada de filamento azul, a distância de retração foi insuficiente e levou ao entupimento e consequente falha de deposição de material. Devido à restrição de alimentação de filamento, o motor passa-a-passo do extrusor foi incapaz de conduzir o filamento, levando ao escorregamento da engrenagem no filamento, Figura 42 [31].



Figura 42 - Escorregamento de filamento na engrenagem.



Da análise de variância, presente na Tabela 14, para os resultados de massa obtidos, para os fatores em estudo, com um intervalo de confiança de 95 % o único fator que se mostrou representativo foi a distância de retração.

Tabela 14 - Análise de variância para a massa.

Fator	GL	SQ	V	F	P
Distância de retração (mm)	2	0,548939	0,274469	41,83	0,002
Velocidade de retração (mm/s)	2	0,009572	0,004786	0,73	0,537
Erro	4	0,026244	0,006561		
Total	8	0,584756			

Os gráficos da representação da influência dos fatores sobre o valor de massa obtida encontram-se presentes no ANEXO A.

Na troca de filamento a distância de retração, teve influência no tempo de atraso entre troca de alimentação de material, apresentado uma relação direta entre um aumento desse fator e quantidade de material depositado. Contudo na condição de maior valor de retração (L9) surgem problemas de sobre extrusão, Figura 41, devido ao aumento da distância de recuperação na mudança de ferramenta. Da análise visual e de resultado de massa, embora a condição L7 tenha resultado no valor de massa mais próximo do valor teórico (-1,7 %), a condição L8 (com 3,7 %) apresenta menor mistura de cores nas torres de purga, concluindo-se que a melhor relação de compromisso se encontra na condição L8.

Desta análise, procedeu-se à alteração dos valores padrão no *firmware*, presentes na Figura 40, ou neste caso, para uma mais prática alteração, inseriram-se no *start code* do *Slic3r* os seguintes comandos:

- M208 F1200 S1 W1;
- M207 F4500<sup>18</sup> S7 W7 Z0.1.

Estes parâmetros serão utilizados ao longo deste trabalho, para os filamentos utilizados<sup>19</sup>.

### 3.4.2 Influência do tamanho na qualidade de impressão

As impressoras Delta são normalmente procuradas pela capacidade de maior volume de impressão e velocidades de impressão elevadas. O uso de um extrusor do tipo *Diamond* implica a necessidade de reduzidas velocidades de impressão para se obterem impressões com boa qualidade, devido ao tempo necessário para a troca de filamento sem falhas de alimentação visíveis.

O estudo deste subcapítulo, com análise de carácter exclusivamente visual, consistiu em imprimir uma peça (cone tricolor [45]) às escalas de 50 %, 100 % e 150 %. A impressão foi realizada a uma velocidade de 25 mm/s com uma altura de camada de 0,3 mm. Como não existe variação de cor na mesma camada, não se utilizaram torres de purga, sendo a transição de filamento feita nas paredes interiores das peças. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 43.

<sup>18</sup> F4500 representa a velocidade de retração de 75 mm/s em mm/min.

<sup>19</sup> No caso de utilização de materiais diferentes é necessário o ajuste dos valores de retração.

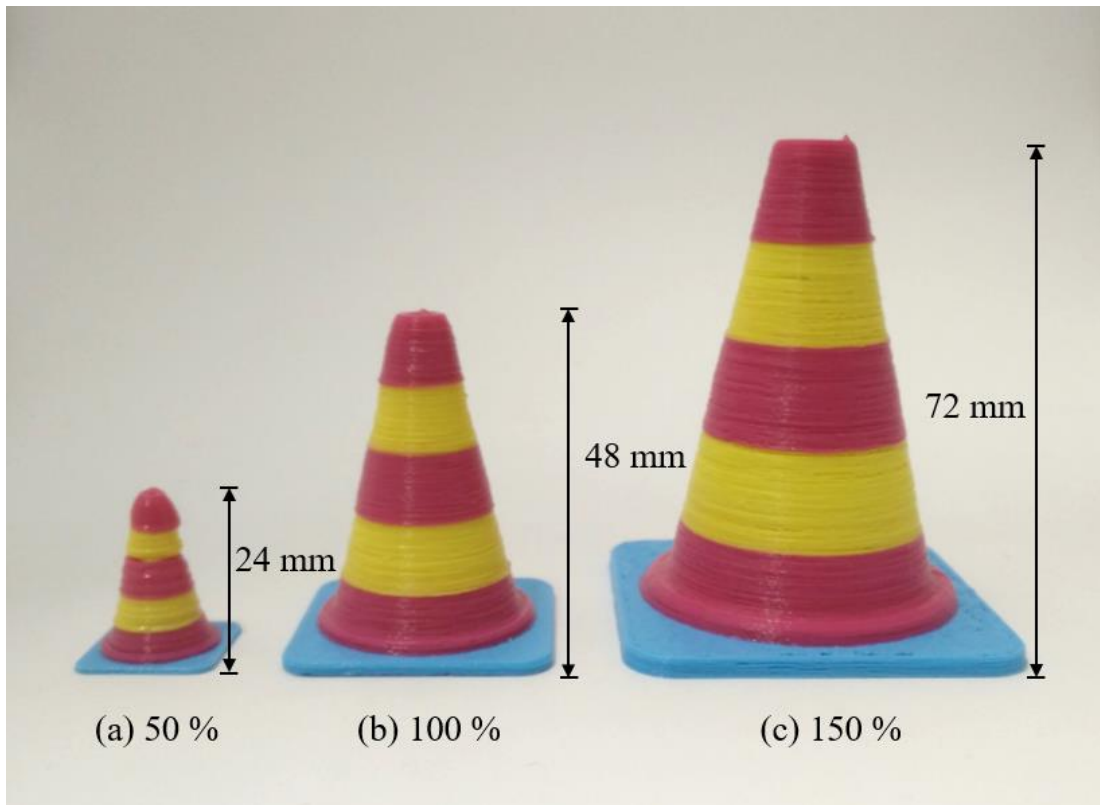


Figura 43 - Resultados da influência de tamanho às escalas (a) 50 % (b) 100 % (c) 150 %.

Da análise visual, constata-se que os melhores resultados foram conseguidos na escala de 150 % (c) da peça original. Na escala de 100 % (b) é possível observar desvio dimensional nas laterais do cone, devido a um menor tempo de acomodação e arrefecimento do filamento depositado. Na escala de 50 % (a) os efeitos de reduzido tempo de arrefecimento são ainda mais notórios. Outra observação foi a irregularidade na deposição das camadas à medida que se diminuía o diâmetro do cone, provocado pelo atraso na troca entre filamentos, originando falhas de deposição. Como não se utilizaram torres de purga, a troca de filamento foi realizada durante o movimento de impressão na peça. Com uma menor dimensão, houve menos tempo para realizar a troca de filamento, resultando em camadas sem deposição, que provocaram uma má acomodação das camadas superiores, que depositaram “no ar”.

Conclui-se com esta análise que na utilização da impressora Delta, principalmente se não se utilizarem torres de purga, para resultados satisfatórios, é necessário que se produzam peças de maior dimensão.

### 3.4.3 Etapas de impressão multicolor

Neste subcapítulo explicam-se as etapas principais para a impressão de um modelo tridimensional multicolor.

As etapas principais, em síntese, passam pela criação de um modelo CAD, exportação do ficheiro para um modelo STL, que será importado num *software* CAM, que gerará o *g-code*, que dará os comandos de impressão à máquina.

Para se realizar impressão em múltiplas cores, é necessário que se tenha o modelo dividido em diversos ficheiros STL, sendo cada ficheiro correspondente a uma cor. Outra solução é criar um ficheiro AMF. A explicação sobre ficheiros AMF será feita mais à frente no texto.

Exemplificando o procedimento para a impressão multicolor, utilizou-se o cone tricolor presente no tópico anterior. Partindo de um modelo CAD sólido, Figura 44, é necessário fazer a divisão do ficheiro STL em várias partes.



Figura 44 - Cone em cor sólida.

O modelo sólido CAD, pode ser dividido em três partes no *Solidworks*®, correspondendo cada um, a um ficheiro do tipo STL, Figura 45.

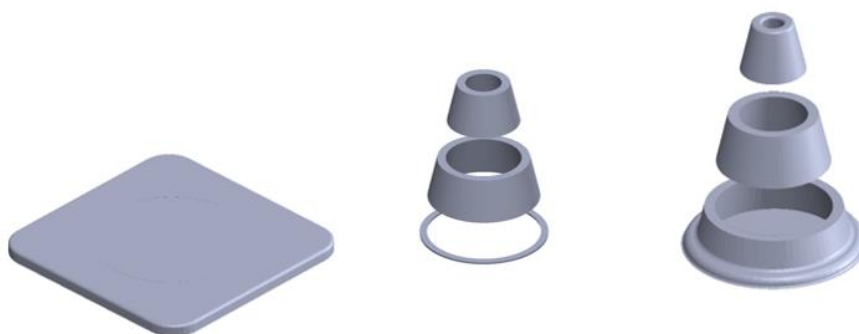


Figura 45 - Divisão do cone em diferentes STL.

Alternativa a este procedimento, seria a criação de um modelo AMF. Com o aparecimento das impressoras multimaterial, a utilização de ficheiros AMF tem-se começado a tornar a norma, em vez da utilização de ficheiros STL [5]. A vantagem do AMF é permitir criar modelos geométricos com divisão por cores, texturas e composição, o que na impressão multicolor não se conseguia definir utilizando ficheiros STL. A divisão e exportação do modelo AMF pode ser realizado num software como o *Autodesk Meshmixer*, Figura 46 [46].

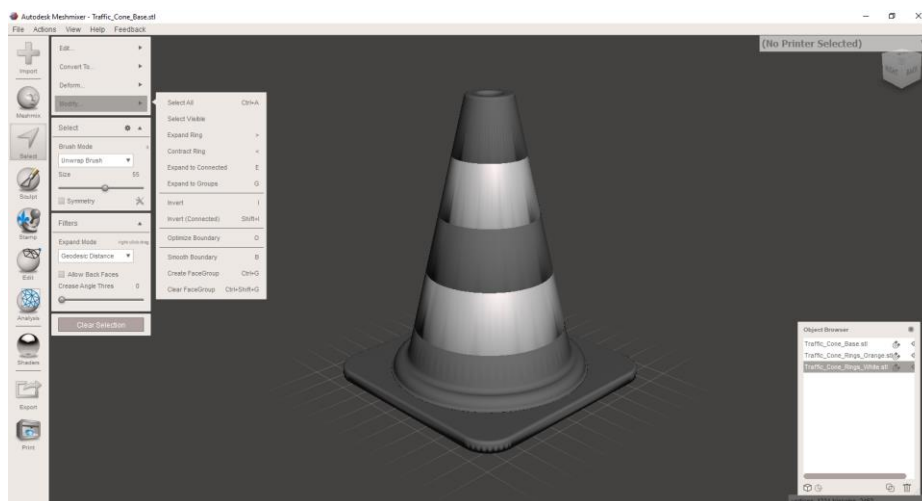


Figura 46 - Criação de modelo AMF no *Autodesk Meshmixer*.

Através do *Repetier Host*, podem ser importados os ficheiros independentes STL, posicionando-os corretamente no ambiente de trabalho, ou importando o ficheiro multimaterial AMF, seleccionando-se no *software* CAM as cores que se querem utilizar, segundo a pré-configuração de alimentadores e cores utilizadas, Figura 47.

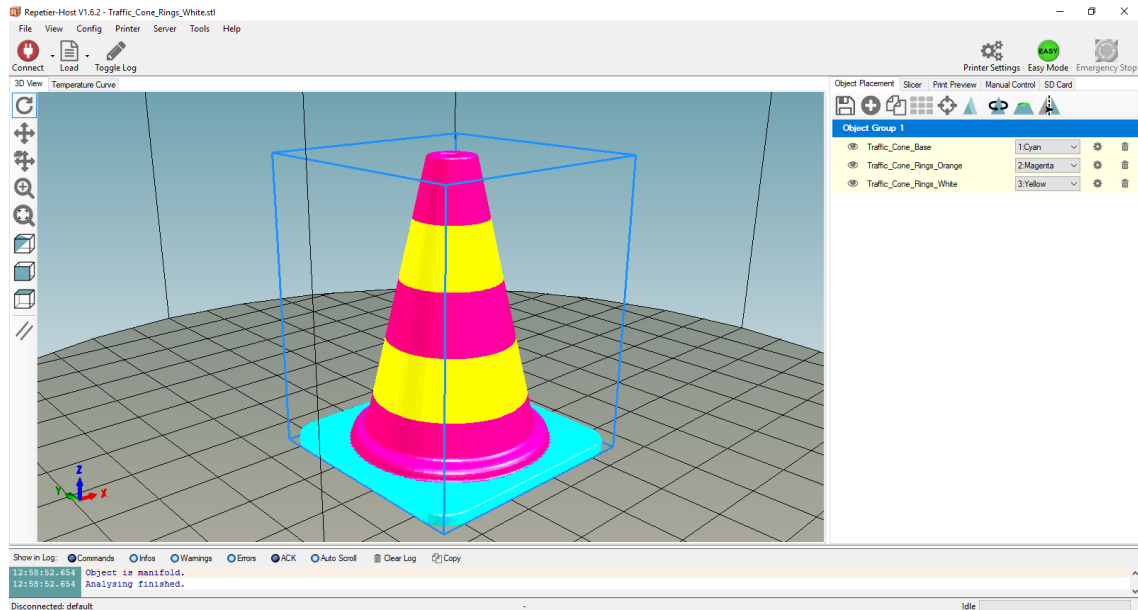


Figura 47 - Cone no *Repetier Host*.

Posteriormente, definem-se os parâmetros de impressão gerais, que foram abordados na revisão bibliográfica. Particularmente, devido à utilização do *Diamond hotend*, é geralmente necessário incluírem-se de torres de purga que foram abordadas no tópico 3.4.1. Neste caso, sendo que não existem camadas com transição de cor, o método utilizado foi o de, nas definições do *Slic3r* definir que a deposição do preenchimento precedesse à dos perímetros, sendo a purga feita, no interior das paredes do modelo, não sendo visível no exterior. Isto permite que em algumas situações não seja necessário a utilização de torres de purga, que provocam um aumento do tempo de impressão e gasto de material, dependendo sempre da geometria e tamanho do modelo, que permita que a purga seja feita eficazmente nas camadas interiores. Um fator também importante será a velocidade de impressão. Embora as impressoras Delta sejam procuradas por permitirem velocidades de impressão elevadas, a necessidade de tempo para a troca de filamento leva à utilização de velocidades entre 20 a 30 mm/s, na utilização da impressora delta do LDPS. Um exemplo com recurso à utilização de torres de purga está presente no tópico 3.4.4.

Definindo-se todos os parâmetros necessários, o *g-code* é gerado no *Slic3r*, que apresenta a informação de tempo de impressão, número de camadas e filamento gasto, Figura 48.

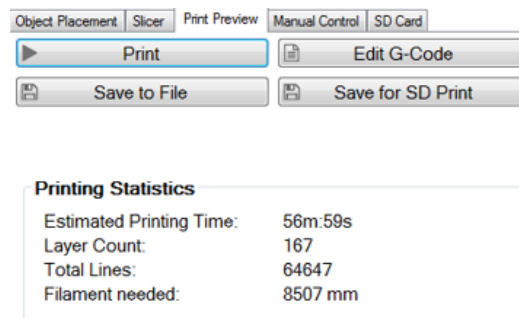


Figura 48 - Estatísticas de impressão no *Slic3r*.

Por fim, dá-se início à impressão do modelo que pode ser observado na Figura 49.



Figura 49 - Cone multimaterial produzido.

#### 3.4.4 Caso prático: anel tricolor

Para se verificar a eficácia do estudo desenvolvido em 3.4.1, e para se estudar o efeito nas torres de purga, imprimiu-se um anel tricolor onde ocorre transição de cor dentro da mesma camada. Para evitar a mistura de cor, e reduzir os problemas em 3.4.2, utilizaram-se torres de purga e velocidades de 15 mm/s. O ficheiro AMF das torres de purga é colocado<sup>20</sup> atrás do objeto, e escalado em altura até à altura do modelo, para que no decurso da impressão, no início de cada camada, a deposição de filamento seja iniciada na purga e não no modelo. O anel tricolor na interface do *Repetier Host*, pode ser observado na Figura 50.

---

<sup>20</sup> Alguns softwares CAM possuem a opção automática de utilização de torres de purga, denominadas de *purge* ou *prime towers*.

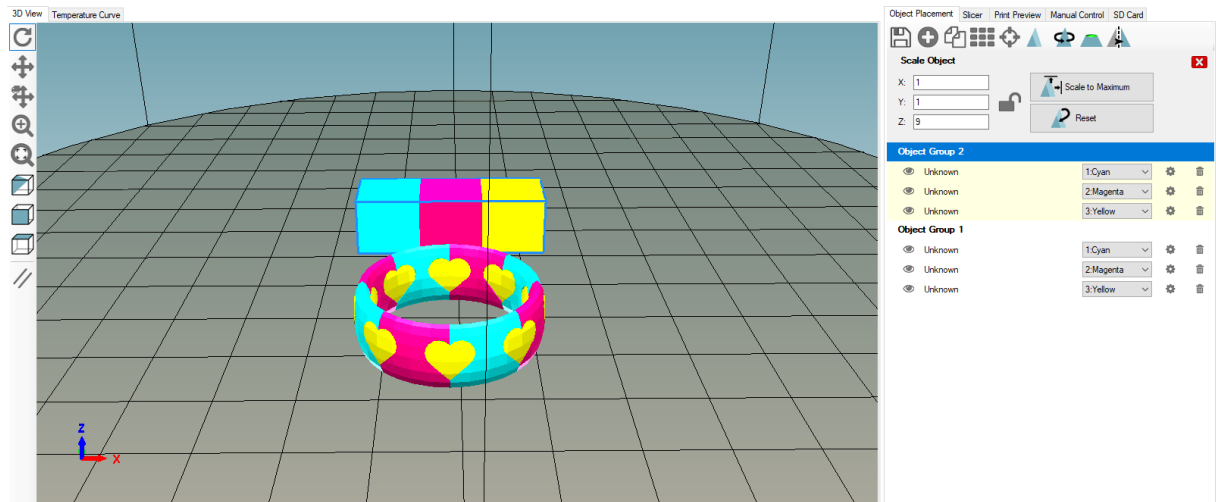


Figura 50 - Anel tricolor no *Repetier Host*.

O modelo obtido está apresentado na Figura 51 e demonstra a eficácia da utilização da purga na troca de filamento. É possível observar a satisfatória transição de cor, dentro da mesma camada, sem que ocorram efeitos de mistura de cor ou falha de deposição.

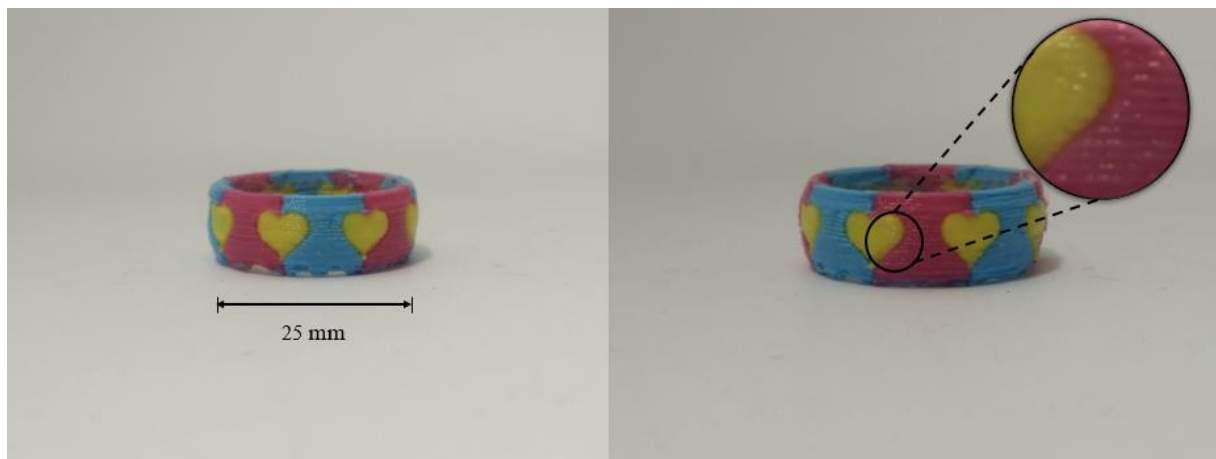


Figura 51 - Resultados do anel obtido e pormenor da transição de cor.

É assim compreendido a necessidade de utilização de um sistema de purga na utilização de um bico extrusor único como o *Diamond hotend*.

### 3.4.5 Caso prático: modo vaso

Como já referido, uma grande vantagem das impressoras de geometria Delta em relação às cartesianas é um maior volume de impressão. O tipo de movimentação também é favorecido quando é necessário fazer trajetórias circulares. Isto faz com que os robôs Delta sejam particularmente vantajosos no fabrico de vasos. O *Slic3r* tem disponível para isso um modo vaso denominado de *Spiral vase*. Para a sua utilização é necessário usar as seguintes definições:

- Um perímetro;
- Ausência de camadas sólidas no topo da peça;
- 0 % de preenchimento;
- Sem material de suporte.



Outro aspeto deste modo vaso é, no decurso da impressão, em vez de um movimento do tipo, impressão numa camada, subida no eixo Z, impressão de nova camada, o movimento ao longo do eixo Z é contínuo em espiral. Além de diminuir os tempos de impressão, a principal vantagem é não deixar uma costura visível na peça, como se pode observar na Figura 52 [47].

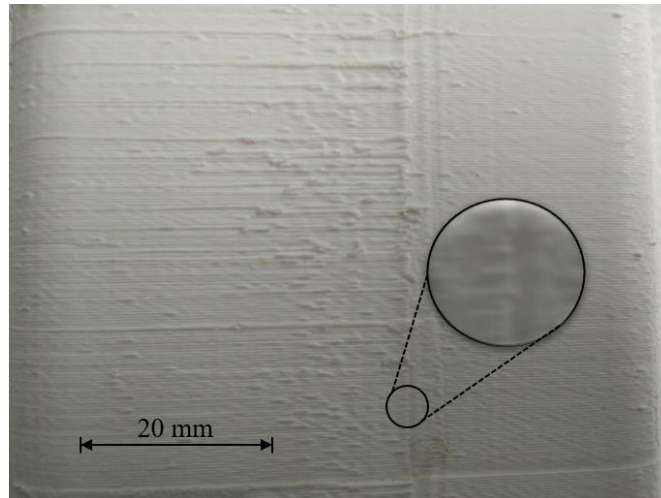


Figura 52 - Costura na união de filamento.

Para testar este modo imprimiu-se um vaso [48]. Algumas etapas da impressão e resultado final estão presentes na Figura 53.

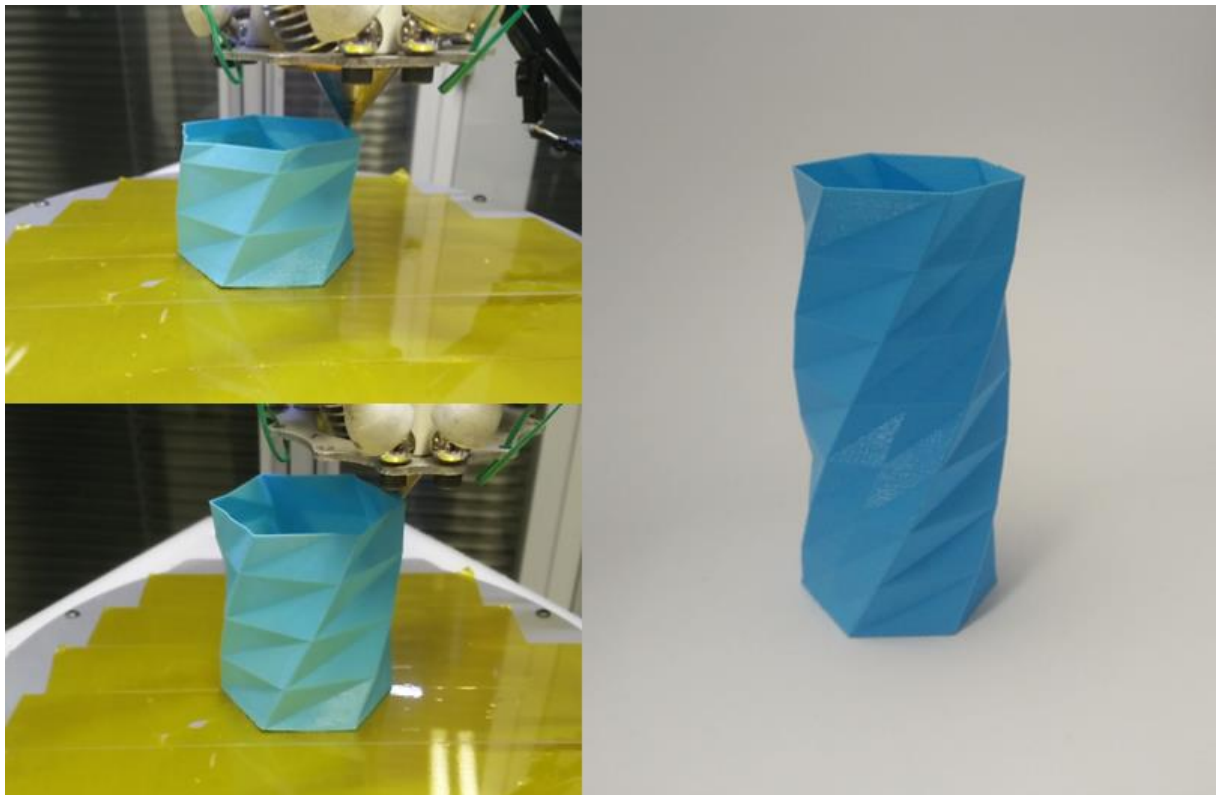


Figura 53 - Etapas de impressão de um vaso.

### 3.5 Teoria da mistura de cor

No *Diamond hotend* com uma única saída de filamento, embora não possuindo uma câmara de mistura, teoricamente possibilita a impressão com mistura de filamentos. Aliás, a mistura de cores é muitas vezes uma consequência indesejável da partilha de um bico extrusor com a alimentação de múltiplos filamentos. O *firmware Marlin 1.1.0 RC7* contempla a possibilidade de mistura de cores. Para o efeito, é necessário fazer uma configuração diferente na utilizada para impressão com três cores. Enquanto na utilização de três cores em simultâneo, define-se a utilização de um bico extrusor único e três alimentadores de filamento, na mistura de cor, é definido que se possui um único extrusor. No software CAM, a mistura de cor, pode ser obtida pela configuração de até 16 extrusores virtuais (limitado pelo *firmware*), que serão combinações percentuais de alimentação entre os três alimentadores da impressora.

Utilizando filamentos das cores azul (*cyan*), magenta (*magenta*), amarelo (*yellow*) e preto (*black*), utilizando um sistema subtrativo de cores CMYK, poder-se-ia obter qualquer cor possível. Como só há alimentação de três cores, utilizando azul, magenta e amarelo, não se obtém o espectro completo de cores, como se observa na Figura 54.



Figura 54 - Mistura de cores com *Diamond hotend* [49].

No ficheiro *configuration.h* do *firmware* é alterado o número de extrusores para 1, e anulada a definição de bico único, Figura 55.

```
// This defines the number of extruders
// :[1,2,3,4]
#define EXTRUDERS 1

// For Cyclops or any "multi-extruder" that shares a single nozzle.
// #define SINGLENOZZLE
```

Figura 55 - Alteração no *firmware* de bico único.

A outra alteração necessária seria a definição de *MIXING\_EXTRUDER*, que permite a utilização de comandos M163 e M164 de mistura de cores, e da definição de *DIRECT\_MIXING\_G1*, para permitir a movimentação simultânea dos três alimentadores sobre a forma comandos ABC, que representam proporções de mistura de filamento, dos alimentadores 1, 2 e 3 respetivamente, Figura 56.



```

/**
 * "Mixing Extruder"
 * - Adds a new code, M165, to set the current mix factors.
 * - Extends the stepping routines to move multiple steppers in proportion to the mix.
 * - Optional support for Repetier Host M163, M164, and virtual extruder.
 * - This implementation supports only a single extruder.
 * - Enable DIRECT_MIXING_IN_G1 for Pia Taubert's reference implementation
 */
#define MIXING_EXTRUDER
#if ENABLED(MIXING_EXTRUDER)
  #define MIXING_STEPPERS 3          // Number of steppers in your mixing extruder
  #define MIXING_VIRTUAL_TOOLS 16    // Use the Virtual Tool method with M163 and M164
  #define DIRECT_MIXING_IN_G1        // Allow ABCDHI mix factors in G1 movement commands

```

Figura 56 - Definição de extrusor de mistura no *firmware*.

Terminadas as alterações no *firmware*, é necessário configurar o *software* CAM. Nas configurações do *Repetier Host*, é necessário definir bico extrusor de mistura (*mixing nozzle*) e definir os extrusores virtuais, definidos de T0 a T15. As proporções dos 16 extrusores virtuais são definidas no *g-code* inicial, por exemplo:

```

; Vermelho
M163 S0 P021
M163 S1 P5
M163 S2 P1
M164 S5

```

Onde os comandos M163 definem as percentagens (P) dos alimentadores 1, 2 e 3 (S0, S1 e S2). O comando M164 S5 define a combinação de cores apresentada na seleção do extrusor virtual 6.

Após todas as alterações, foi feita a tentativa de imprimir uma peça com cores misturadas. O *g-code* criou linhas de código com utilização dos extrusores virtuais definidos, no entanto não ocorreu qualquer movimentação dos motores de alimentação de filamento. A movimentação simultânea dos três alimentadores, só foi possível obter, quando executados comandos do estilo G1 E10 A0.2 B0.2 C0.6, inserindo manualmente as proporções A, B e C, neste exemplo respetivamente 20, 20 e 60 % de alimentação para cada extrusor. Durante o processo de impressão só se conseguiu que ocorresse mistura de cores, inserindo manualmente nas linhas de código de movimento dos extrusores, as proporções de alimentação pretendidas. Este processo seria demasiado variável e moroso. Conclui-se que a combinação entre *firmware* Marlin e o *software* Repetier Host, não permite a mistura de cores.

### 3.6 Análise qualitativa impressão delta

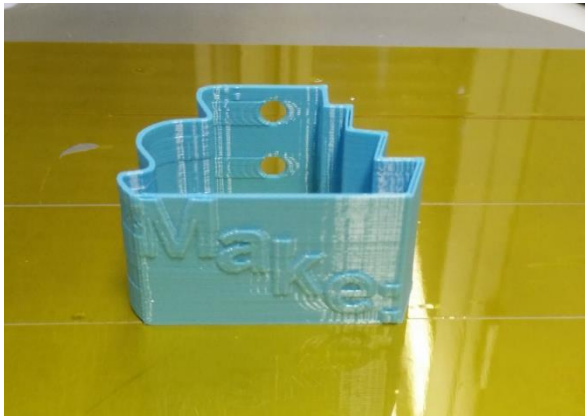
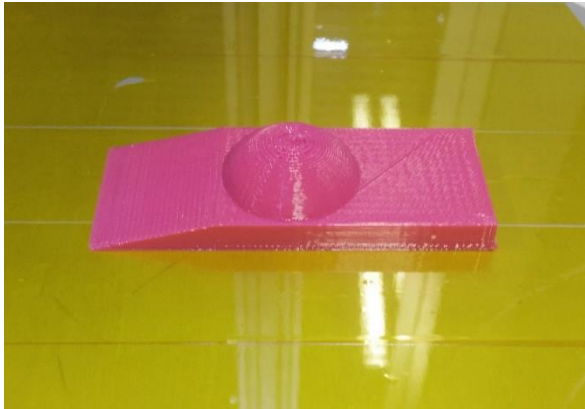
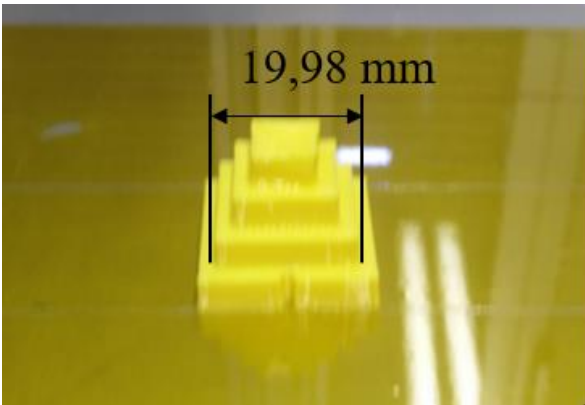
A *MAKE* [50] é uma revista norte-americana com foco no DIY em projetos de impressão 3D, robótica e eletrónica. Anualmente tem lançado um conjunto de modelos com vista a testar a qualidade de impressão das máquinas FDM. O objetivo destes ficheiros de teste, não são o de

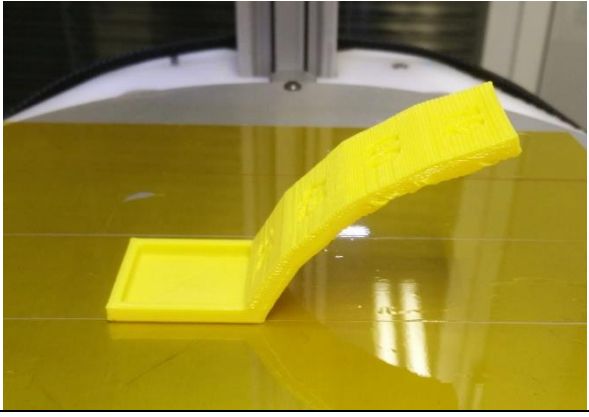
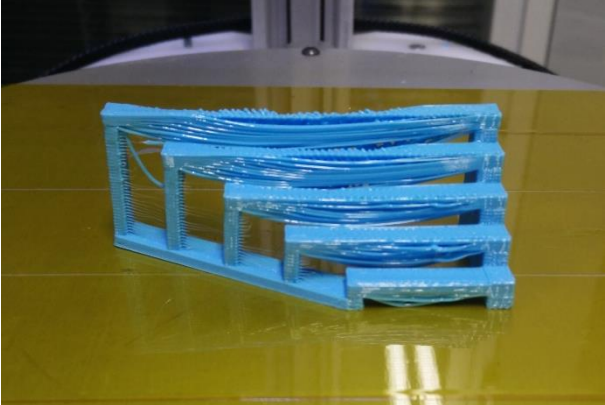
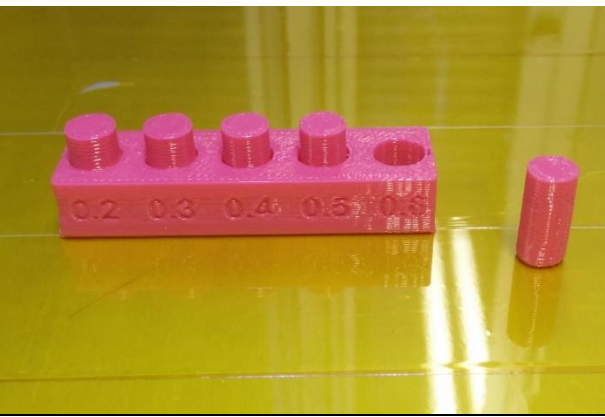
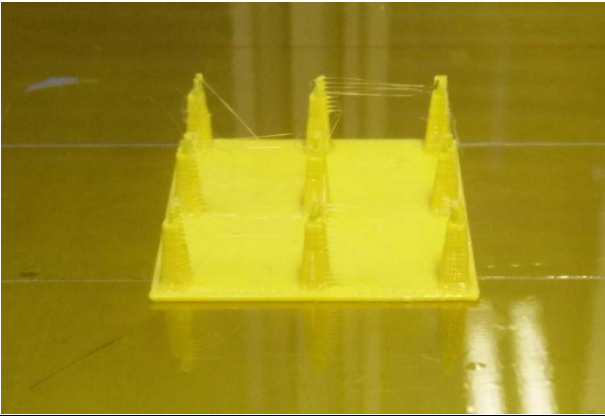
<sup>21</sup> As percentagens no CMYK são subtrativas, logo P0, representa 100 % de alimentação do extrusor.

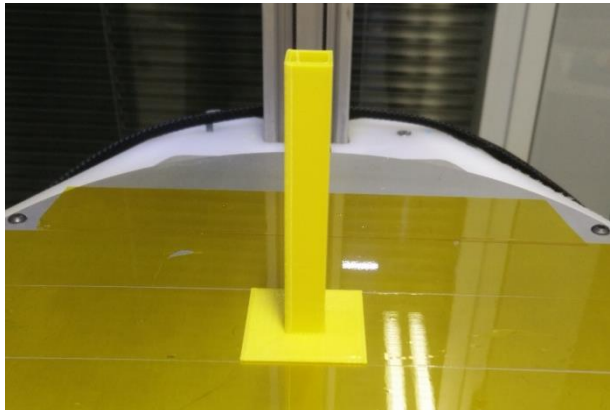
diretamente efetuar análises de calibração, mas sim o de *benchmarking* entre impressoras, neste caso o da impressora Delta em estudo. Os ficheiros do teste de 2017 podem ser obtidos em [51].

As peças foram impressas e foram discutidos alguns pormenores relativos aos resultados obtidos nas peças de teste. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise de impressão

Teste	Discussão
<b>Superfície Vertical</b> 	<p>A peça apresentou boa qualidade geral de acabamento, apresenta ligeiros defeitos por efeitos de vibração na construção da parede por algum desgaste apresentado nas rótulas magnéticas do efetor.</p>
<b>Acabamento horizontal</b> 	<p>De uma maneira geral, a peça apresentou bom acabamento de impressão.</p>
<b>Rigor dimensional</b> 	<p>Conseguiram-se valores muito próximos de 20 mm no segundo degrau do modelo, que comprova os valores dimensionais obtidos na peça de calibração do capítulo 3.1.4.</p>

<b><i>Overhang</i></b>	
	<p>Conseguiu imprimir-se a peça de teste até ao fim, no entanto a partir de 45 ° de inclinação surgiram defeitos por falta de ventoinha para a peça.</p>
<b><i>Bridging</i></b>	
	<p>Neste teste a Delta falhou mais uma vez por falta de ventoinha para arrefecimento da peça, que não permitiu que os filamentos solidificassem rapidamente e fosse possível criar pontes de material.</p>
<b><i>Negative Space Tolerance</i></b>	
	<p>Só o pino de tolerância de 0,6 mm saiu livremente na base de impressão, apresentado alguma sobre extrusão, responsável pela fusão em alguns pontos dos pinos com a peça.</p>
<b><i>Performance da retração</i></b>	
	<p>Embora a utilização do <i>Diamond hotend</i> e de tubos de <i>bowden</i> longos dificultem a retração, o efeito de <i>oozing</i> foi reduzido.</p>

<i>Z Wobble</i>	
	<p>Verifica-se o alinhamento vertical da coluna, que demonstra que não existem problemas de desalinhamento das torres da impressora.</p>

Em conclusão dos resultados obtidos, verifica-se que há rigor dimensional da impressora Delta. O estudo de retração resultou em menores problemas de *oozing* e *stringing*. Por outro lado, para melhorar a qualidade de acabamento das peças, a utilização de uma ventoinha para arrefecimento das peças observa-se necessário.

## 4 Métodos e Materiais

### 4.1 Metodologia

O objetivo principal deste estudo foi a análise do comportamento mecânico de componentes multicolores. Para o efeito foram desenvolvidos provetes de flexão, em PLA, com três filamentos de cor distinta. A máquina utilizada foi a impressora delta do LDPS com um extrusor do tipo *Diamond* com alimentação de três filamentos. Os materiais em estudo foram três bobinas de filamento novo, da marca *BQ* [52], nas cores azul (*topazio blue*), magenta (*magenta*) e amarelo (*sulphuric yellow*). A ficha técnica fornecida pelo fabricante encontra-se presente no ANEXO B. Quando não em uso, o material foi guardado num compartimento hermético, junto com material dissecante.

Ao longo da atividade experimental, os filamentos têm a seguinte designação:

- C – Azul;
- M – Magenta;
- Y – Amarelo.

Os provetes foram contruídos segundo a norma ASTM D790 [53] com as dimensões (127 x 12 x 3). Foram desenhados provetes para o fabrico em duas orientações: (a) no plano (XY) e (b) num plano lateral (XZ) representados na Figura 57. As peças foram desenhadas no *software* CAD *SolidWorks*.

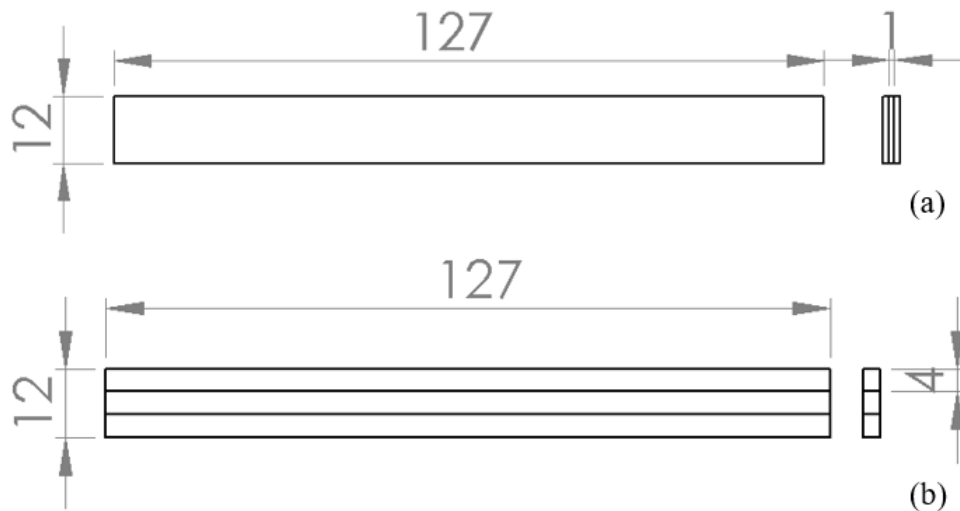


Figura 57 - Desenho esquemático dos provetes (a) no plano (b) lateral.

As amostras foram construídas para serem impressas como peças multicolores, estão divididas em três camadas. As posições relativas das camadas nas (posição 1, 2 e 3 em relação à base) são apresentadas na Figura 58.



Figura 58 - Posicionamento das camadas de cor.

Como já referido, o âmbito desta experiência foi a análise das propriedades mecânicas de do mesmo material (PLA) e posteriormente o estudo de amostras com camadas distintas de cor com vista à análise da interação entre camadas sobre uma solicitação mecânica. Foram realizadas duas orientações já anteriormente descritas. Assim, sendo, os fatores de variação neste estudo foram exclusivamente a combinação de cores e a orientação. Todos os restantes parâmetros posteriormente enunciados foram mantidos fixos em todas as condições.

Foram desenvolvidos dois estudos distintos. Num primeiro caso de estudo os fatores foram a cor, em três níveis correspondentes a cada um dos filamentos em estudo, e segundo as orientações de construção, no plano e lateral, de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Fatores e níveis do caso 1.

Fatores		Níveis		
Cor (u.a.)	C	M	Y	
Orientação (u.a.)	Plano		Lateral	

De acordo com a Figura 58, as posições das camadas das amostras, para o caso de estudo 1, apresentam-se na Tabela 17.

Tabela 17 – Posicionamento das camadas de cor no caso 1.

Cor	Posição 1	Posição 2	Posição 3
C	C	C	C
M	M	M	M
Y	Y	Y	Y

Foram produzidas três amostras para cada cor e orientação, num total de 18 amostras.

Num segundo caso, os fatores em estudo foram a combinações de cores (Cc) e a orientação, segundo a análise fatorial, devolvendo seis níveis para a combinação de cores e duas orientações. A Tabela 18 apresenta as combinações de camadas em cor em função das posições da Figura 58.

Tabela 18 - Posicionamento das combinações de cor no caso 2.

Combinação de cor	Posição 1	Posição 2	Posição 3
Cc1	Y	M	C
Cc2	Y	C	M
Cc3	M	Y	C
Cc4	C	Y	M
Cc5	M	C	Y
Cc6	C	M	Y

Cc – Combinação de cor

Foram produzidas três amostras para cada combinação de cor e orientação, num total de 36 amostras.

O *software* CAM utilizado foi o *Repetier-Host* sendo o *g-code* gerado no pós-processador *Slic3r*. Seguindo as recomendações do fabricante a temperatura de extrusão foi fixada em 220 °C [52]. Na base de impressão utilizou-se fita *Kapton* e devido a problemas de adesão da primeira camada, fixou-se o valor de 70 °C [41]. Pela ocorrência de variações de temperatura na base aquecida [41], as amostras foram impressas uma de cada vez, no centro da mesa.

Sendo o interesse estudar a interação entre camadas de cor, seria necessário que a amostra fabricada apresentasse o maior preenchimento possível (e menor volume de vazios possível) para evitar uma falha mecânica precoce [54], que não, a por interação entre camadas. Deste modo utilizou-se um preenchimento de 100 %.

Santana *et al* [21] referem que o valor de multiplicação de extrusão tem um efeito direto no preenchimento e variação dimensional de uma peça impressa. Além da necessidade de garantir elevado preenchimento, no caso da impressora delta utilizada, a resistência por atrito à alimentação de filamento, provocado pelo elevado comprimento dos tubos de *bowden* (1000 mm), levou à compensação do multiplicador de extrusor até ao valor de 110 %, utilizado.

A altura camada foi de 0,2 mm, para se obter um número idêntico de camadas por cada cor. Nas amostras no plano obtiveram-se 5 camadas por nível de cor, e nas amostras laterais 20 camadas por cor. Na opção de espessura de camada com as definições padrão (100 %), observando a deposição de filamento na simulação do *Slic3r* era visível a presença de espaços vazios entre filamentos (Figura 59) no plano lateral (a). A ocorrência era ainda mais evidenciada na orientação lateral (b).

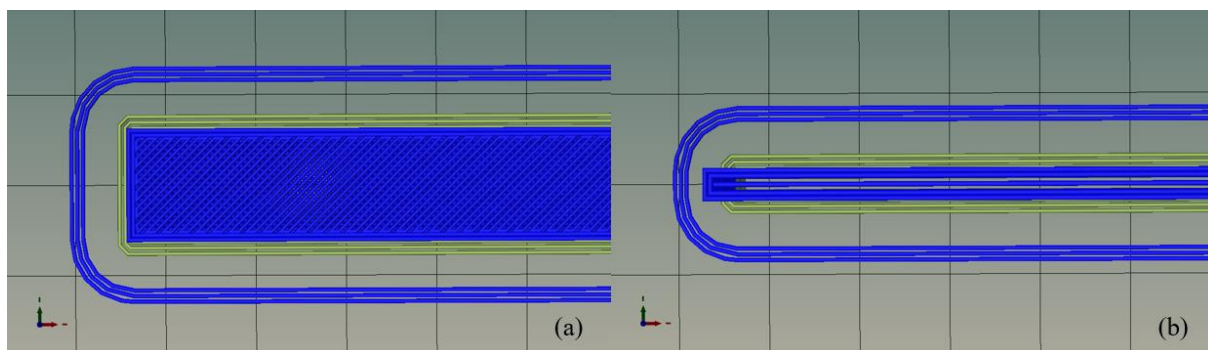


Figura 59 - Simulação no *Slic3r* com 100% de largura de camada. (a) no plano (b) lateral.

Analisaram-se diferentes percentagens de espessura de camada até um valor de 200 % (Figura 60), onde se obteve a total união e preenchimento de filamento.



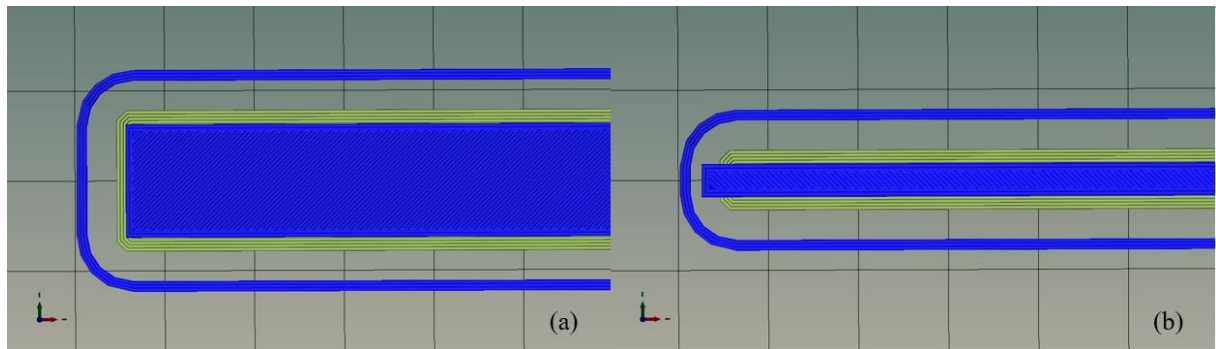


Figura 60 - Simulação no *Slic3r* com 100 % de largura de camada. (a) no plano (b) lateral.

A orientação de deposição foi de 45 ° com 2 perímetros. No parâmetro de velocidade, o *Slic3r* distingue velocidade para diferentes operações na impressão (por exemplo primeira camada, perímetros, preenchimento). Para não haver influência no tempo de deposição e acomodação dos filamentos, mantiveram-se todos os valores de velocidade em 30 mm/s, à exceção da primeira camada, que para se obter uma boa adesão à base, ficou estabelecida em 50 % das restantes velocidades.

A Tabela 19 resume os parâmetros fixos de impressão utilizados.

Tabela 19 - Parâmetros fixos de impressão.

Parâmetros fixos	Valores
Temperatura do extrusor (°C)	220
Temperatura da base (°C)	70
Preenchimento (%)	100
Orientação de impressão (°)	45
Velocidade de impressão (mm/s)	30
Velocidade da primeira camada (mm/s)	15
Multiplicador de extrusão (%)	110
Perímetros	2
Diâmetro do bico (mm)	0,4
Diâmetro do filamento (mm)	1,75
Espessura de camada (mm)	0,2
Largura de camada (mm)	0,4

Na Figura 61 pode-se observar as amostras nas orientações plano (a) e lateral (b) no software *CAM Repetier Host*.



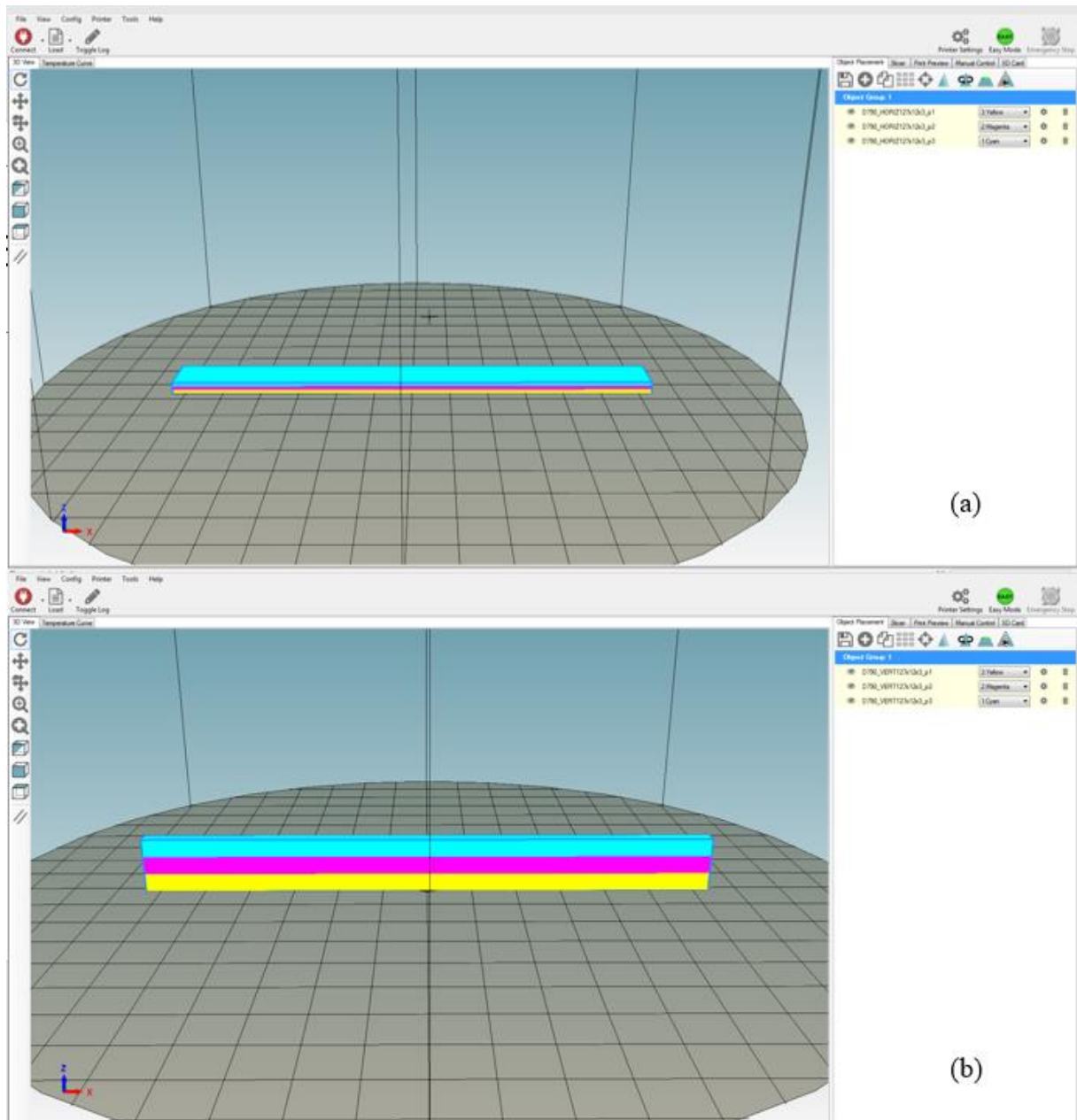


Figura 61 - Provetes no *Repetier Host* nas orientações (a) no plano (b) lateral.

Antes da produção das amostras repetiram-se as recomendações de calibração apresentadas ao longo do Capítulo 3.

Os provetes foram produzidos a uma temperatura média de 22 °C e 45 % de humidade relativa.

Na Figura 62 é possível observar os provetes dos dois casos de estudo em análise para ensaio mecânico de flexão em 3 pontos, num total de 54 amostras.



Figura 62 – Amostras produzidas.

Após o fabrico de cada amostra mediu-se a sua massa. Para a medição de massa foi utilizada uma balança *Dini Argeo ScaleHouse HLD300* (máx. 300 g,  $d=0,005$  g) presente no LDPS. A massa foi comparada com o valor de massa teórico<sup>22</sup> de acordo com os resultados de massa específica obtidos no Capítulo 5.1, e em caso de rejeição, repetida a sua impressão.

Após o fabrico de todos os provetes, foram registadas imagens com recurso a um microscópio *Zeiss AxioPhot* com uma lente de ampliação de 5x presente no Laboratório de Materialografia do DEMec. Foram observadas as superfícies laterais e de topo com vista à análise da união entre camadas, deposição dos filamentos e presença de vazios.

Foram realizados ensaios de flexão em 3 pontos segundo a Norma ASTM D790 [53]. Foi utilizada a máquina MTS 810 presente no LET-DEMec com uma célula de carga de 10 kN, e uma velocidade de 5 mm/min aplicada por um rolete de 8 mm. Por limitações do equipamento o deslocamento foi limitado a 10 mm. A distância entre roletes de suporte (10 mm de diâmetro) foi de 48 mm.

A configuração experimental pode ser observada na Figura 63.

<sup>22</sup> Os valores massa teóricos foram de 5,89 g para a orientação no plano e de 6,53 g na orientação lateral.

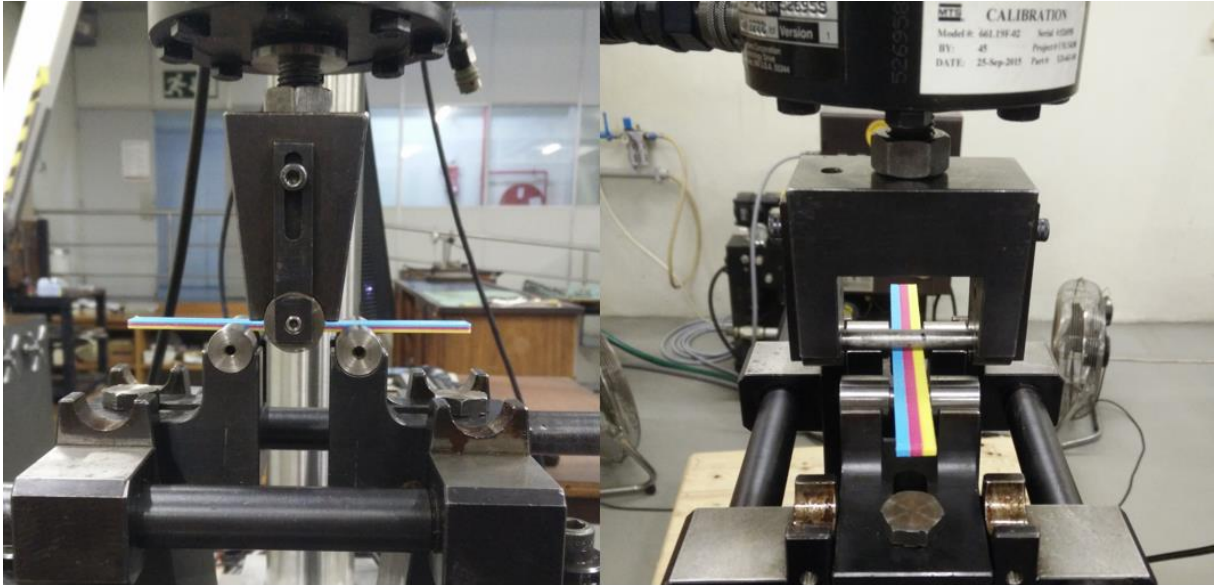


Figura 63 - Máquina de ensaio.

Os valores obtidos de força e deslocamento, segundo a norma ASTM D790 permitem a obtenção da Tensão máxima à flexão ( $\sigma_{fm}$ ) e Módulo de Elasticidade à flexão ( $E_f$ ).

A Tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) é definida por:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} [MPa] \quad (4.1)$$

Onde:

$P$  – Carga em kN;

$L$  – Distância entre suportes em mm;

$b$  – Largura do provete em mm;

$d$  – Espessura do provete em mm.

A deformação ( $\varepsilon$ ) no centro da amostra é obtida por:

$$\varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} [mm/mm] \quad (4.2)$$

Onde:

$D$  – Máxima deformação no centro da amostra em mm.

Sabendo-se os valores anteriormente calculados é possível calcularem-se as curvas tensão-deformação. As curvas de tensão-deformação das amostras encontram-se no Anexo D. É possível também calcular o Módulo de Elasticidade à flexão ( $E_f$ ) traçando uma tangente à zona linear da curva de tensão-deformação. Em todas as amostras, a tangente foi obtida por análise de regressão linear no mesmo intervalo de deformação. O Módulo de Elasticidade à flexão é calculado por:

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} [MPa] \quad (4.3)$$

Onde:

$m$  – Tangente da porção linear inicial da curva de tensão-deformação, em N/mm.

Em síntese o procedimento experimental está resumido na Figura 64.

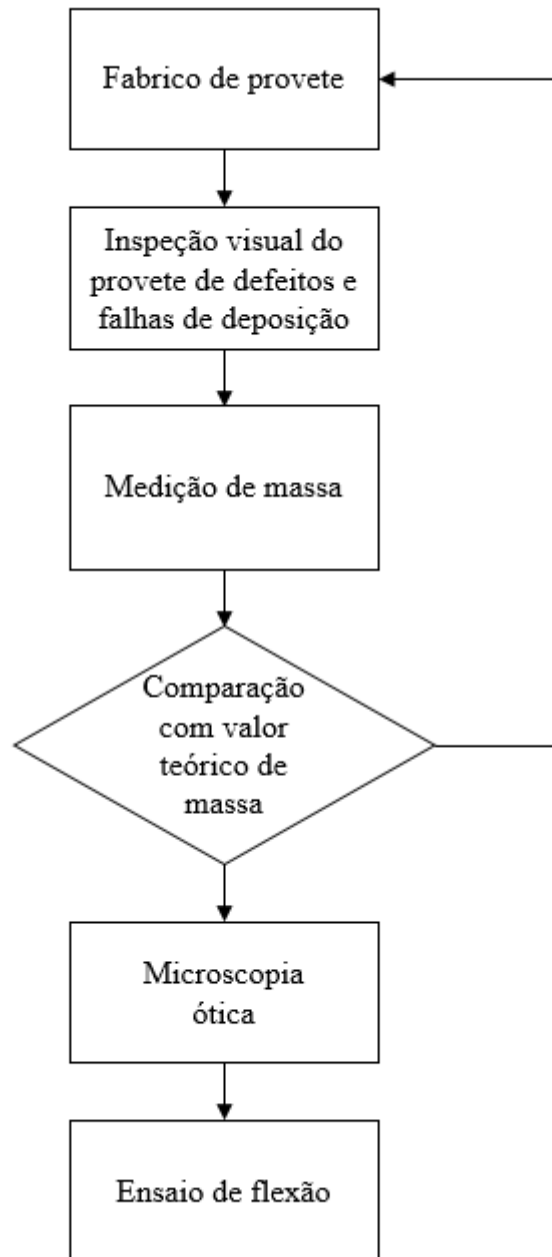


Figura 64 - Diagrama do procedimento experimental.

## 4.2 Medição da massa específica dos materiais

Foram recolhidas três amostras de cada bobina de filamento (Figura 65), com vista ao cálculo da massa específica de cada de filamento de cor.

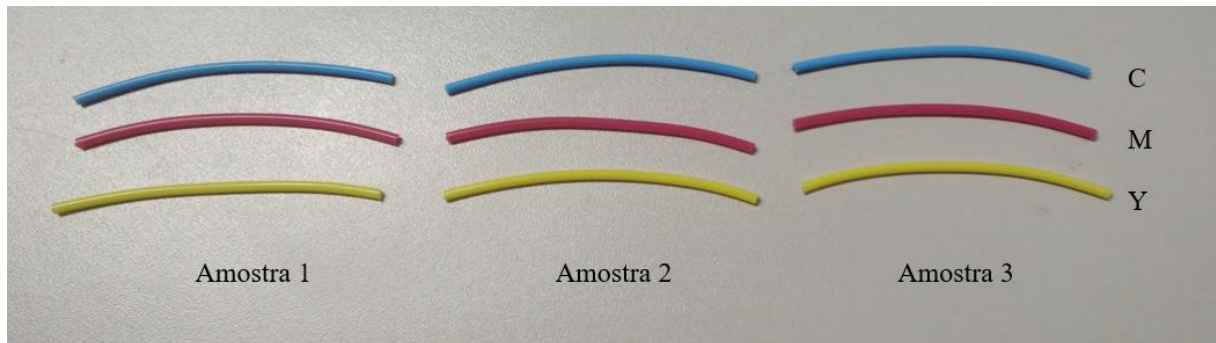


Figura 65 - Amostras de filamento.

Foi medido o diâmetro e comprimento em vários pontos, e medidas as massas, com vista ao cálculo da massa específica dos diferentes filamentos.

#### 4.3 Caso de estudo 1: comparação entre cores

O primeiro caso de estudo teve como fundamento a análise das propriedades mecânicas independentes de cada filamento. Os parâmetros foram os fixados na Tabela 19. A orientação das camadas da Figura 58 está representada na Tabela 20, nas orientações no plano e lateral.

Tabela 20 - Parâmetros do caso de estudo 1.

Condição	Cor	Orientação	Posição 1	Posição 2	Posição 3
1	C	Plano	C	C	C
2	M	Plano	M	M	M
3	Y	Plano	Y	Y	Y
4	C	Lateral	C	C	C
5	M	Lateral	M	M	M
6	Y	Lateral	Y	Y	Y

#### 4.4 Caso de estudo 2: combinação de camadas de cor

O segundo caso de estudo teve como objetivo a análise das propriedades de provetes de flexão com três camadas de cor distintas. Fizeram-se amostras com as combinações possíveis de posição relativa nas camadas (Figura 58), garantido sempre a presença dos três filamentos em simultâneo na amostra. A Tabela 21 apresenta os parâmetros

Tabela 21 - Parâmetros do caso de estudo 2.

<b>Condição</b>	<b>Combinação de cor</b>	<b>Orientação</b>	<b>Posição 1</b>	<b>Posição 2</b>	<b>Posição 3</b>
1	Cc1	Plano	Y	M	C
2	Cc2	Plano	Y	C	M
3	Cc3	Plano	M	Y	C
4	Cc4	Plano	C	Y	M
5	Cc5	Plano	M	C	Y
6	Cc6	Plano	C	M	Y
7	Cc1	Lateral	Y	M	C
8	Cc2	Lateral	Y	C	M
9	Cc3	Lateral	M	Y	C
10	Cc4	Lateral	C	Y	M
11	Cc5	Lateral	M	C	Y
12	Cc6	Lateral	C	M	Y

## 5 Resultados e discussões

### 5.1 Massa específica dos materiais

Os resultados de massa específica<sup>23</sup> são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Massa específica aparente dos filamentos.

Filamento	Diâmetro (mm)					Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )				
	A1	A2	A3	$\bar{X}$	DP	A1	A2	A3	$\bar{X}$	DP
C	1,69	1,71	1,69	1,69	0,01	1,248	1,251	1,287	1,25	0,02
M	1,80	1,79	1,78	1,79	0,01	1,240	1,252	1,272	1,25	0,02
Y	1,74	1,73	1,71	1,73	0,02	1,245	1,234	1,251	1,25	0,01

Nota: A1, A2 e A3 significam respetivamente Amostra 1, 2 e 3.

$\bar{X}$ : valor médio.

DP: desvio padrão.

Os valores de massa específica mostram coerência entre diferentes tipos de filamento e vão de encontro a valores encontrados na revisão bibliográfica [18]. No entanto, nos resultados de diâmetro obtido encontra-se uma disparidade de valores, com o valor inferior no caso do azul com  $1,69 \pm 0,01$  mm e no outro lado o magenta com  $1,79 \pm 0,01$  mm. O amarelo apresenta o valor mais próximo do valor fornecido pelo fabricante (1,75 mm) com  $1,73 \pm 0,02$  mm. Como o extrusor *Diamond hotend* só tem um bico para a alimentação dos três filamentos, no programa *Slic3r* para o cálculo do fluxo de material, só é possível fornecer um valor de diâmetro de filamento. Como se obtiveram valores diferentes de diâmetro nas diferentes cores, um valor não ideal do diâmetro no *software* é possível que tenha influência na quantidade de material depositado nas amostras.

### 5.2 Caso de estudo: cores sólidas

A Tabela 23 apresenta os resultados das massas obtidas de cada amostra, o valor médio de desvio padrão de cada condição.

Tabela 23 - Resultados da medição de massa dos provetes.

Condição	Cor	Orientação	Massa (g)				
			A1	A2	A3	$\bar{X}$	DP
1	C	Plano	5,81	5,86	5,77	5,81	0,05
2	M	Plano	5,45	5,66	5,66	5,66	0,12
3	Y	Plano	5,30	5,69	5,62	5,62	0,21
4	C	Lateral	6,17	6,20	6,18	6,18	0,02
5	M	Lateral	6,06	5,72	5,79	5,79	0,18
6	Y	Lateral	5,85	5,72	5,70	5,72	0,08

<sup>23</sup> Massa específica é definida como o quociente entre massa e volume de um corpo (SI: kg/m<sup>3</sup>).

Os valores médios de massa e desvio padrão por condição estão representados na Figura 66.

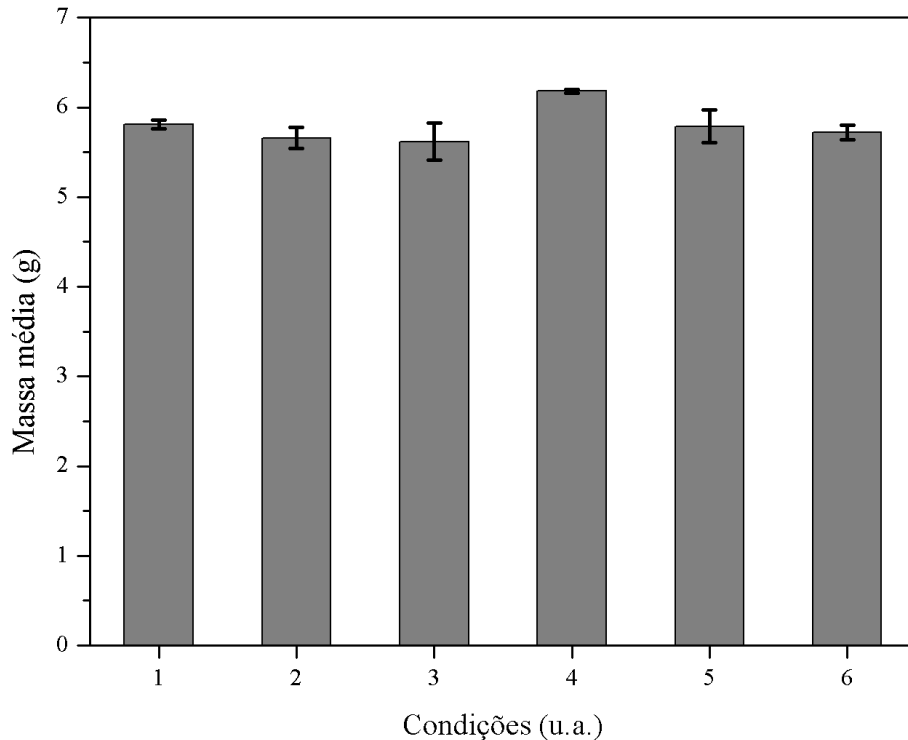


Figura 66 - Representação da massa média do caso 1.

Os valores obtidos de massa apresentaram valores mais elevados nas amostras produzidas na lateral, que pode ser explicado pela utilização de uma largura de extrusão de 200 %, tendo provocado um aumento na largura das peças e aumento de volume.

Dos valores médios, entre os valores máximos e mínimos, a variação do valor de massa para a orientação no plano foi de 3,38 %, e para a orientação lateral de 7,44 %.

Os resultados de massa, em ambas orientações, apresentaram resultados inferiores aos valores teóricos, o que demonstram que mesmo com 100 % de preenchimento e compensação na largura de camada, é possível que tenham ocorrido falhas de deposição.

Após a etapa de medição de massa, um segundo ponto foi a análise microscópica das amostras produzidas. Embora não seja possível visualizar a acomodação interna das camadas e da presença de vazios, foi possível avaliar a deposição das camadas de filamento e a presença de possíveis defeitos nas paredes laterais dos provetes.

Nas Figura 67 e Figura 68, estão apresentadas imagens microscópicas das superfícies lateral e de topo da amostra que apresentou o menor valor de massa, de 5,30 g, com uma diferença de 10 % em relação ao valor teórico. É possível observar a presença de vazios entre camadas na superfície lateral, enquanto na superfície de topo, devido à compensação da largura de extrusão e achatamento dos filamentos, não é visível a transição entre deposição de filamentos.



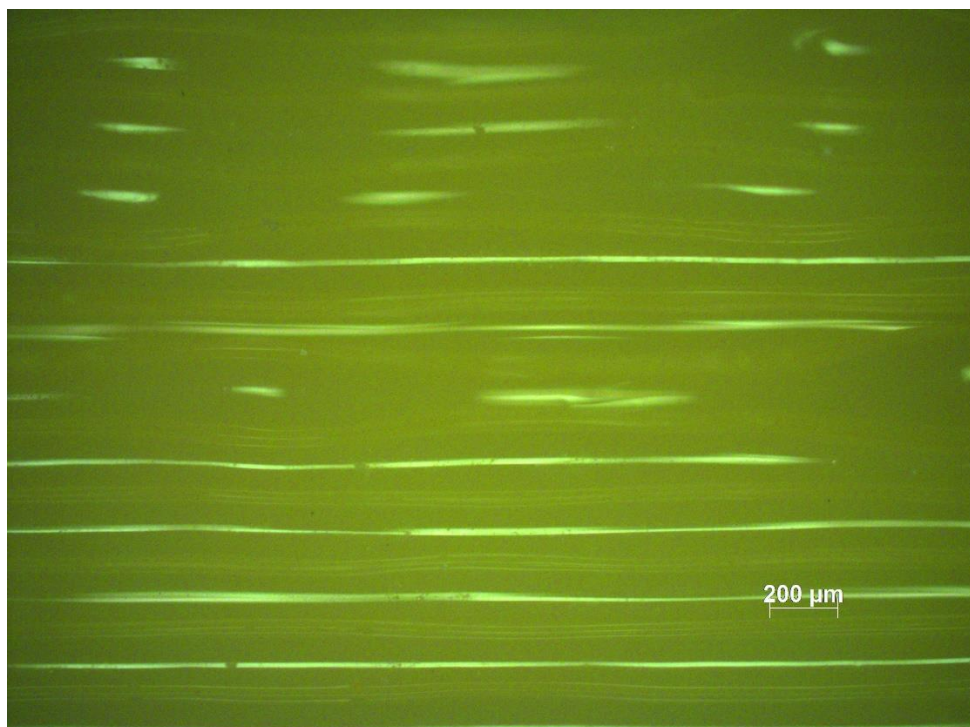


Figura 67 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 3.

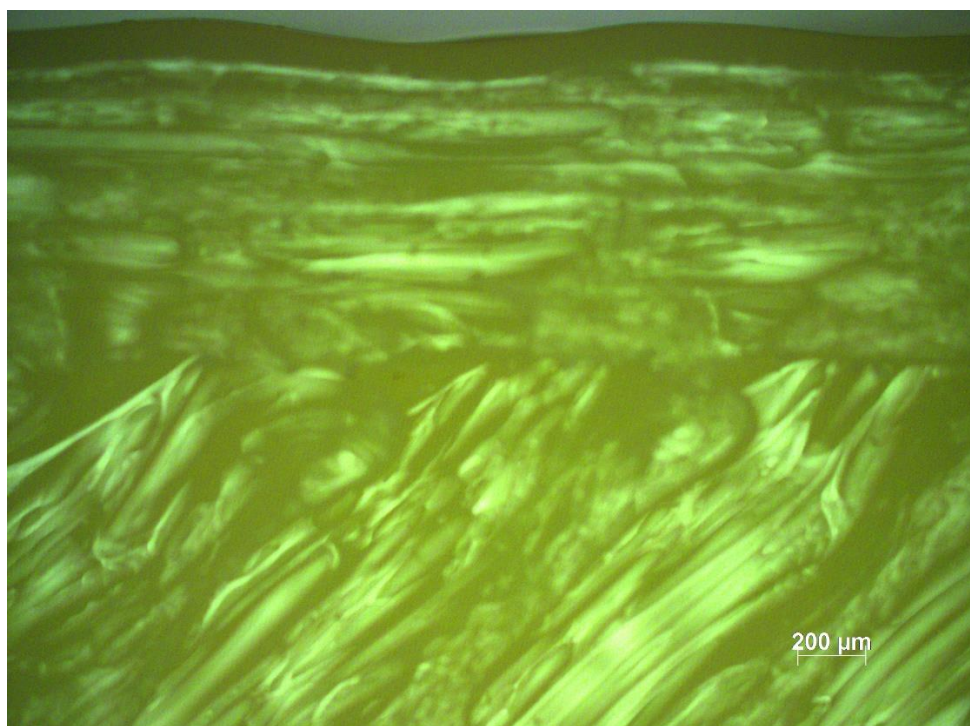


Figura 68 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 3.

Os resultados presentes na Tabela 24, apresentam os valores médios Tensão Máxima média e Módulo de Elasticidade médio obtidos no ensaio de flexão.

Tabela 24 - Resultados de Tensão Máxima média  $\sigma_{fm}$  e Módulo de Elasticidade médio  $E_f$  médio.

Condição	Cor	Orientação	$\sigma_{fm}$ média <sup>24</sup> [MPa]	DP [MPa]	$E_f$ médio <sup>25</sup> [GPa]	DP [GPa]
1	C	Plano	112,84	5,55	3,87	0,37
2	M	Plano	112,40	3,03	3,76	0,12
3	Y	Plano	104,85	9,75	3,66	0,26
4	C	Lateral	114,18	2,59	3,85	0,09
5	M	Lateral	99,17	7,35	3,41	0,32
6	Y	Lateral	104,25	4,58	3,73	0,07

As Figura 69 e Figura 70 representam graficamente os valores de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade do caso 1.

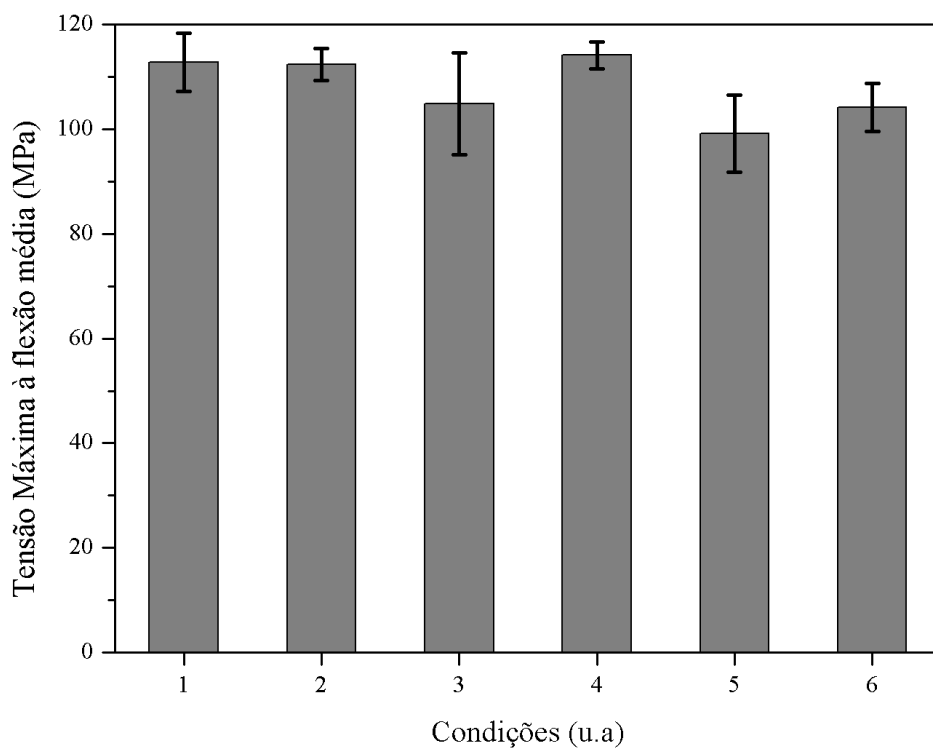


Figura 69 - Representação da Tensão Máxima à flexão média no caso 1.

<sup>24</sup> Média da Tensão Máxima à flexão das amostras de cada condição.

<sup>25</sup> Média do Módulo de Elasticidade à flexão das amostras de cada condição.

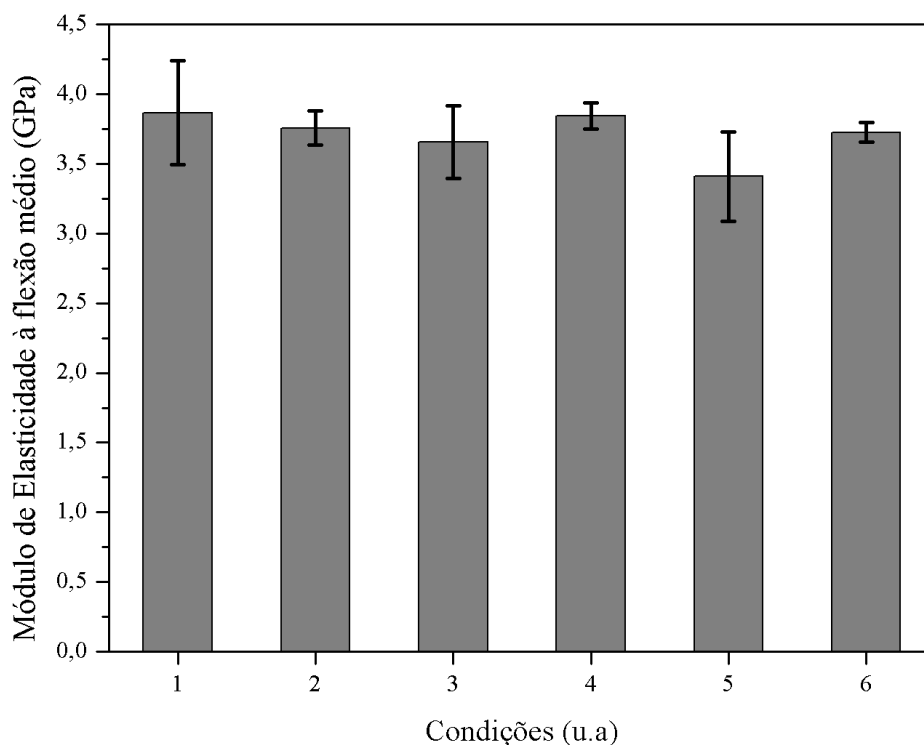


Figura 70 - Representação do Módulo de Elasticidade médio no caso 1.

Os resultados mostram que as duas condições que obtiveram os maiores valores de massa, que correspondem às orientações no plano e lateral das amostras azuis (C), obtiveram os maiores valores de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade. No caso da condição 3 que tinha apresentado menor massa, em termos de resistência mecânica, não apresentou os menores valores, no entanto apresentou a maior dispersão de resultados. No entanto, devido ao desvio padrão apresentado, as condições não apresentam resultados estatisticamente diferentes.

O estudo envolveu a variação dos fatores cor e orientação, por tal motivo, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para avaliar a representatividade dos fatores nos valores obtidos nos resultados de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade à flexão. A Tabela 25, apresenta os resultados obtidos para a Tensão Máxima em função dos fatores cor e orientação.

Tabela 25 - Análise de variância para a Tensão Máxima.

Fatores	GL	SQ	V	F	P
Cor	2	269,78	134,89	3,40	0,063
Orientação	1	52,60	52,60	1,32	0,269
Erro	14	555,96	39,71		
Total	17	878,34			

Para um intervalo de confiança de 95 %, os resultados demonstram não haver influência significativa nos dois fatores.

As representações gráficas da influência dos fatores nos resultados de Tensão Máxima, podem-se observar nas Figura 71 e Figura 72.

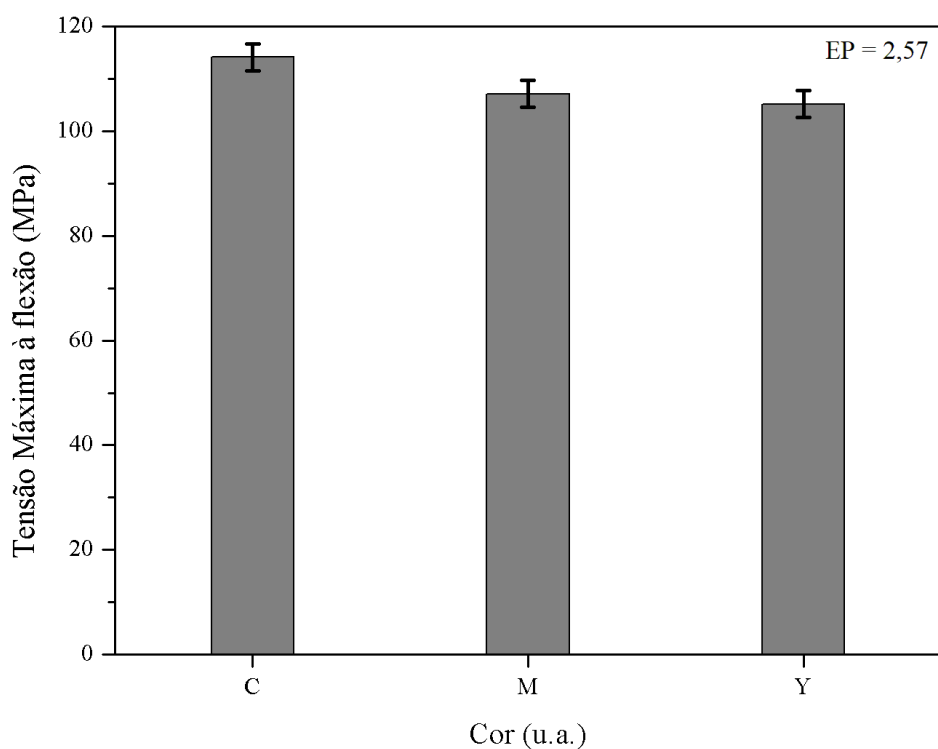


Figura 71 - Representação da influência dos níveis de cor sobre a Tensão Máxima à flexão

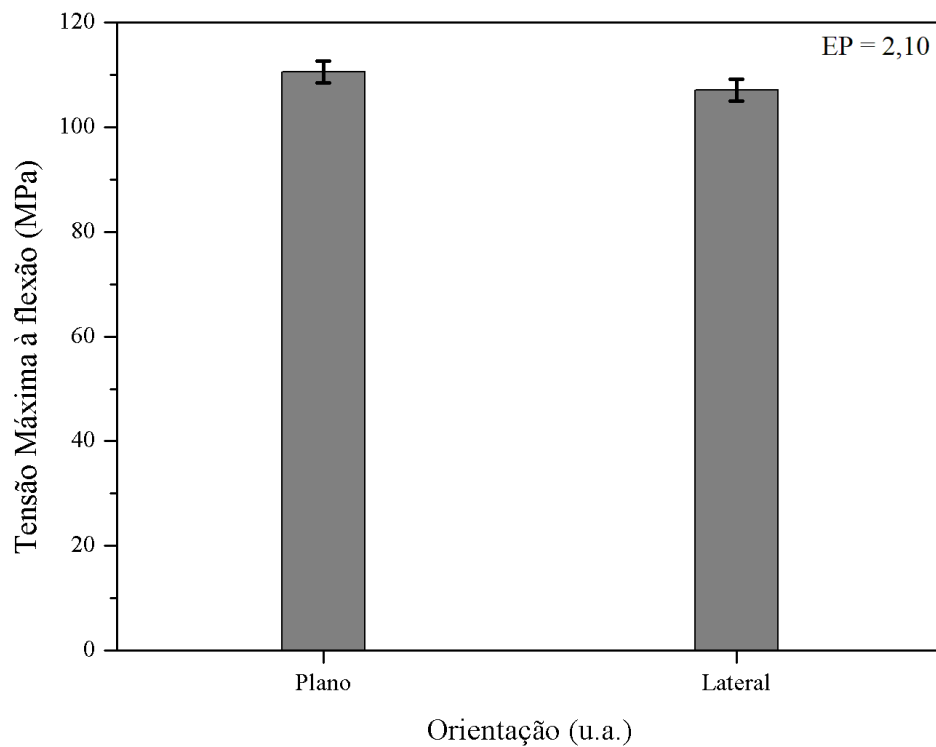


Figura 72 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Tensão Máxima à flexão

Os resultados da análise de variância do Módulo de Elasticidade em função dos fatores, apresenta-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade.

Fatores	GL	SQ	V	F	P
Cor	2	0,29772	0,14886	2,70	0,102
Orientação	1	0,05071	0,05071	0,92	0,354
Erro	14	0,77257	0,05518		
Total	17	1,12100			

Os resultados obtidos demonstram que também não houve influência significativa dos parâmetros de processo.

As representações gráficas da influência dos fatores nos resultados de Módulo de Elasticidade, podem-se observar nas Figura 73 e Figura 74.

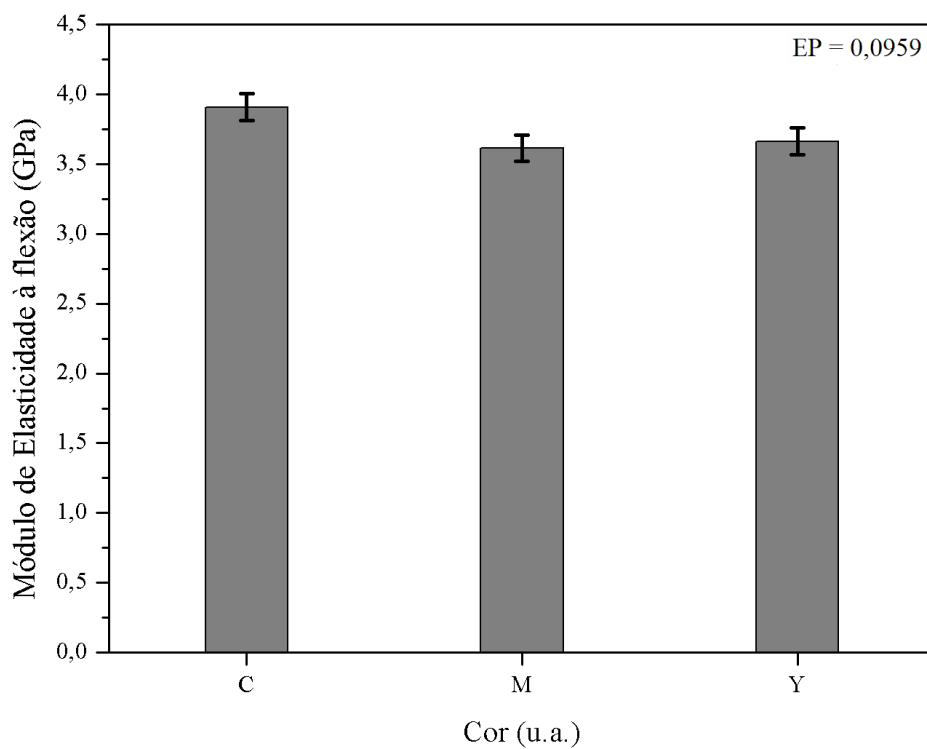


Figura 73 - Representação da influência dos níveis de cor sobre a Módulo de Elasticidade à flexão.

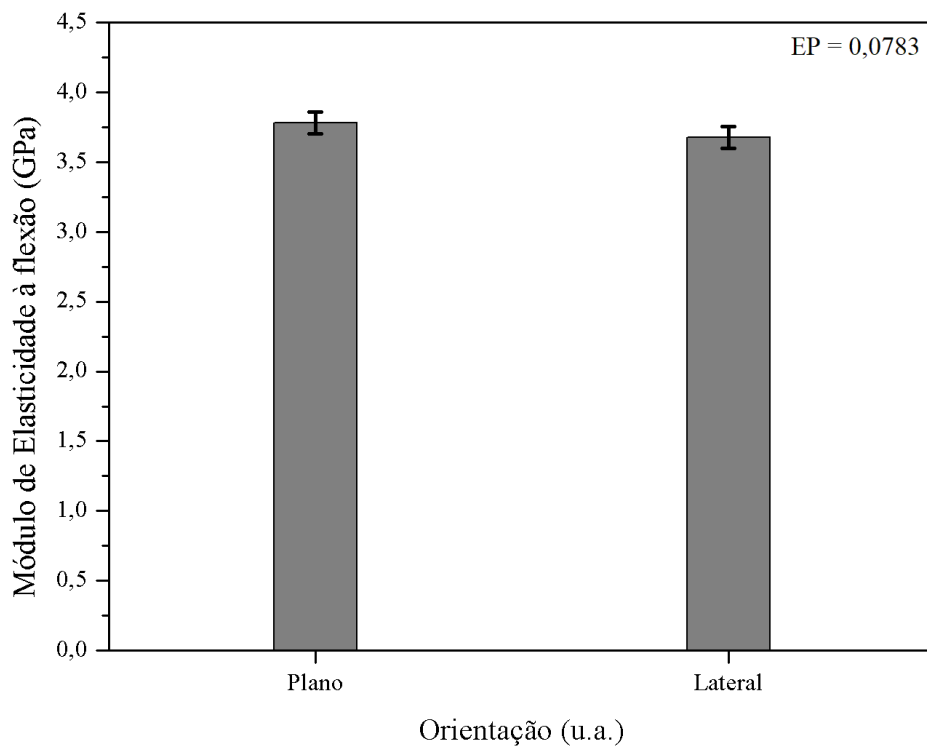


Figura 74 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Módulo de Elasticidade à flexão.

A análise do primeiro caso de estudo mostra não haver influência significativa da cor e orientação, na resistência mecânica dos materiais. A não influência da cor na resistência mecânica por ensaios de flexão vai de encontro aos resultados obtidos por Santana [31]. Os valores de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade obtidos do ensaio de flexão aproximam-se dos resultados obtidos por Letcher [55]. Na revisão bibliográfica abordou-se a influência da orientação de construção nas propriedades mecânicas das peças produzidas por FDM, mas segundo Chacón *et al.* [56] a baixa anisotropia das amostras pode ser explicada por um elevado preenchimento e reduzido volume de vazios, provocado pela utilização de um valor elevado de largura de camada.

### 5.3 Caso de estudo: combinação de camadas de cor

A Tabela 27 apresenta os resultados de massa, valor médio e desvio padrão de cada amostra por condição do caso de estudo 2.

Tabela 27 - Resultados da medição de massa dos provetes.

Condição	Combinação de cor	Orientação	Massa (g)				
			A1	A2	A3	$\bar{X}$	DP
1	Cc1	Plano	5,80	5,83	5,83	5,83	0,02
2	Cc2	Plano	5,81	5,83	5,89	5,83	0,04
3	Cc3	Plano	5,83	5,78	5,83	5,83	0,03
4	Cc4	Plano	5,78	5,86	5,82	5,82	0,04
5	Cc5	Plano	5,78	5,81	5,79	5,79	0,02
6	Cc6	Plano	5,78	5,71	5,75	5,75	0,04
7	Cc1	Lateral	6,14	6,12	6,16	6,14	0,02
8	Cc2	Lateral	6,05	6,11	6,15	6,11	0,05
9	Cc3	Lateral	5,87	5,96	6,06	5,96	0,10
10	Cc4	Lateral	6,05	6,08	6,05	6,05	0,01
11	Cc5	Lateral	6,05	6,08	6,05	6,05	0,01
12	Cc6	Lateral	6,03	6,04	6,06	6,04	0,02

Os valores médios e de massa estão representados graficamente na Figura 75.



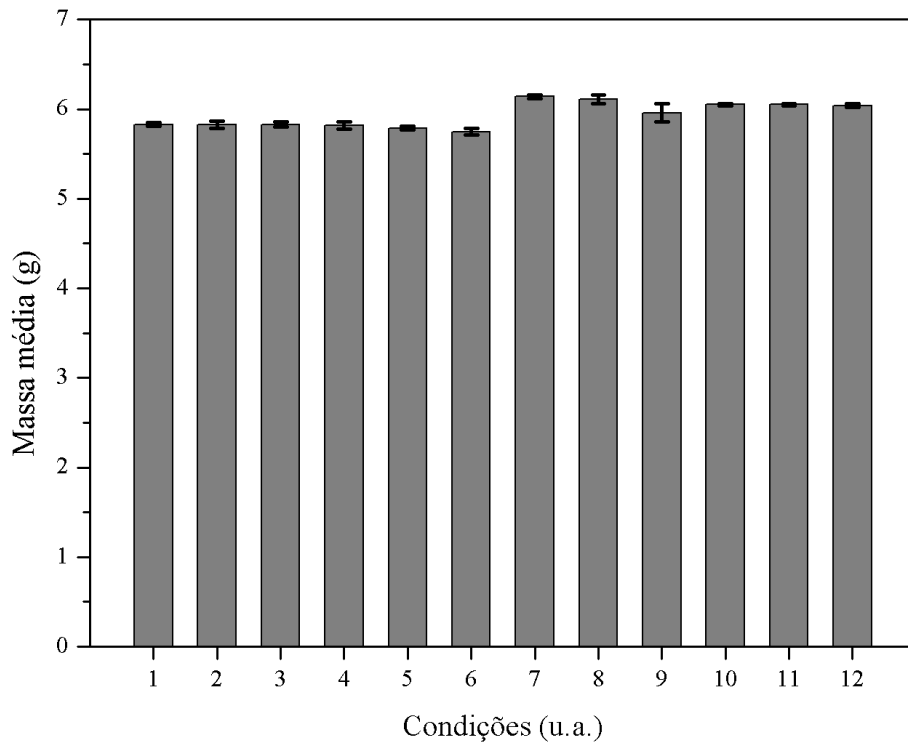


Figura 75 - Resultados da massa média do caso 2.

Os resultados de massa obtidos demonstraram na orientação no plano, coerência de resultados, sendo que a maior diferença de massa em relação ao valor teórico, ocorre na amostra 2 da condição 6, com uma diferença de 3,06 %. Na orientação lateral também demonstram coerência nos resultados, à exceção da condição 9, onde na amostra 1 se encontra uma diferença de 10 % em relação ao valor de massa teórico.

No segundo caso de estudo, na análise microscópica, além da observação de defeitos que pudessem explicar as variações de massa, observaram-se também as transições de cor entre camadas. Na Figura 76, é possível observar a falha de deposição na transição entre camadas na amostra 1 da condição 9.

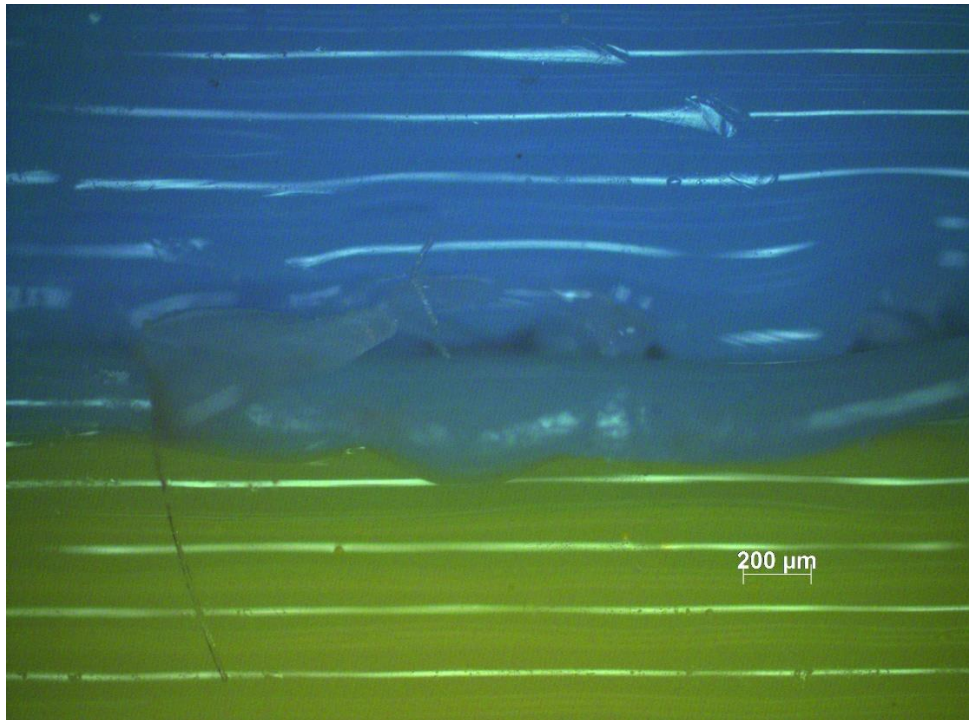


Figura 76 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 9.

Na mesma amostra também é possível observar a mistura involuntária de cor magenta na transição entre as camadas de cor amarela e azul. Este fenómeno é provocado pela utilização partilhada do bico extrusor pelos três filamentos, Figura 77.

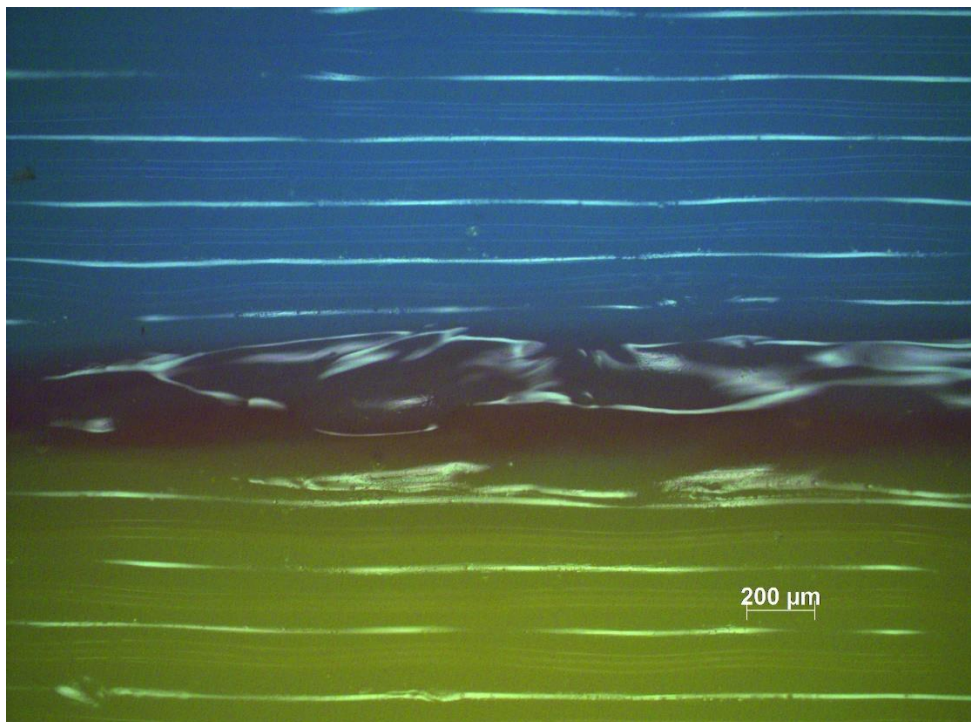


Figura 77 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 9.

Na Figura 78, é apresenta-se a imagem microscópica da lateral da amostra 1 da condição 5, que apresentou o maior desvio de massa em relação ao valor teórico (3,06 %). É possível observar a mistura de filamentos na transição de camada de cor.

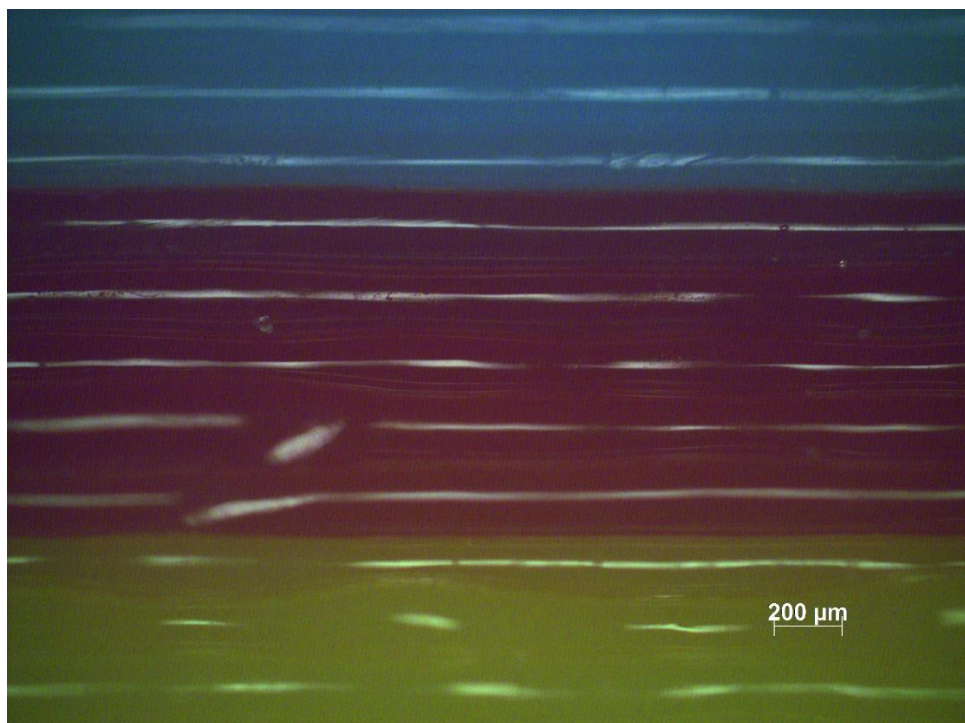


Figura 78 - Imagem microscópica da lateral da amostra A1 da condição 6.

Os resultados das médias e desvio padrão de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade para o segundo caso de estudo, estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados de Tensão Máxima média  $\sigma_{fm}$  e Módulo de Elasticidade médio  $E_f$  médio.

Condição	Combinação de cor	Orientação	$\sigma_{fm}$ média [MPa]	DP [MPa]	$E_f$ médio [GPa]	DP [GPa]
1	Cc1	Plano	118,62	5,66	4,15	0,11
2	Cc2	Plano	112,23	6,07	3,98	0,17
3	Cc3	Plano	113,25	4,02	3,95	0,15
4	Cc4	Plano	108,30	2,66	3,85	0,12
5	Cc5	Plano	112,63	3,05	3,94	0,03
6	Cc6	Plano	114,70	2,00	3,92	0,08
7	Cc1	Lateral	98,83	2,83	3,46	0,14
8	Cc2	Lateral	101,86	1,87	3,47	0,15
9	Cc3	Lateral	102,01	0,91	3,64	0,08
10	Cc4	Lateral	101,32	4,28	3,48	0,28
11	Cc5	Lateral	99,32	7,06	3,48	0,35
12	Cc6	Lateral	97,65	0,98	3,28	0,08

A representação gráfica dos resultados de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade, estão presentes nas Figura 79 e Figura 80.

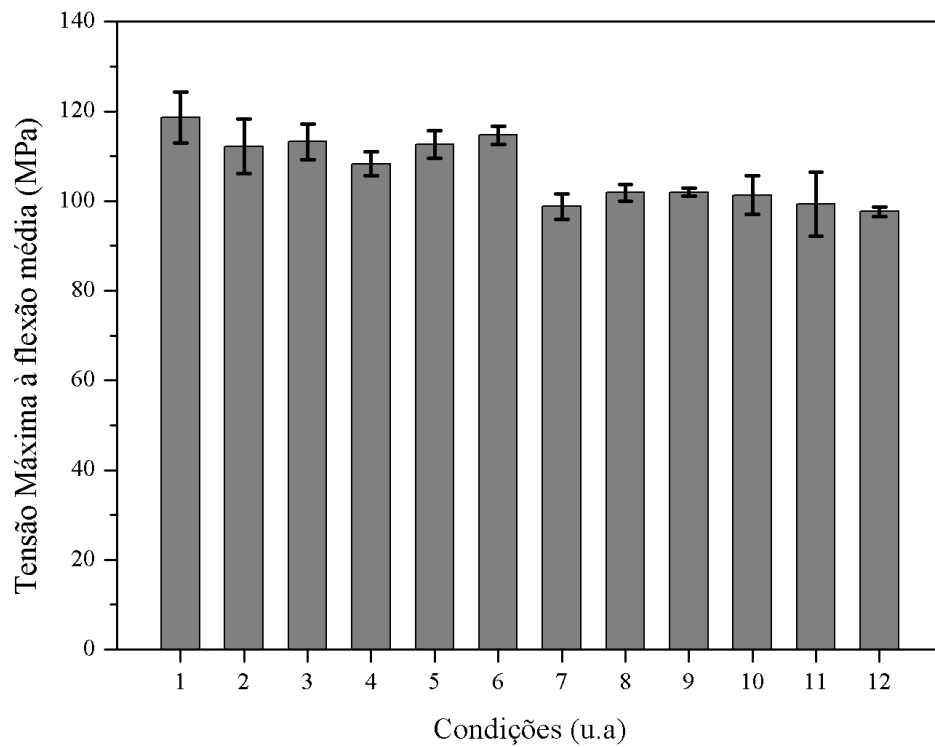


Figura 79 - Representação da Tensão Máxima à flexão média no caso 2.

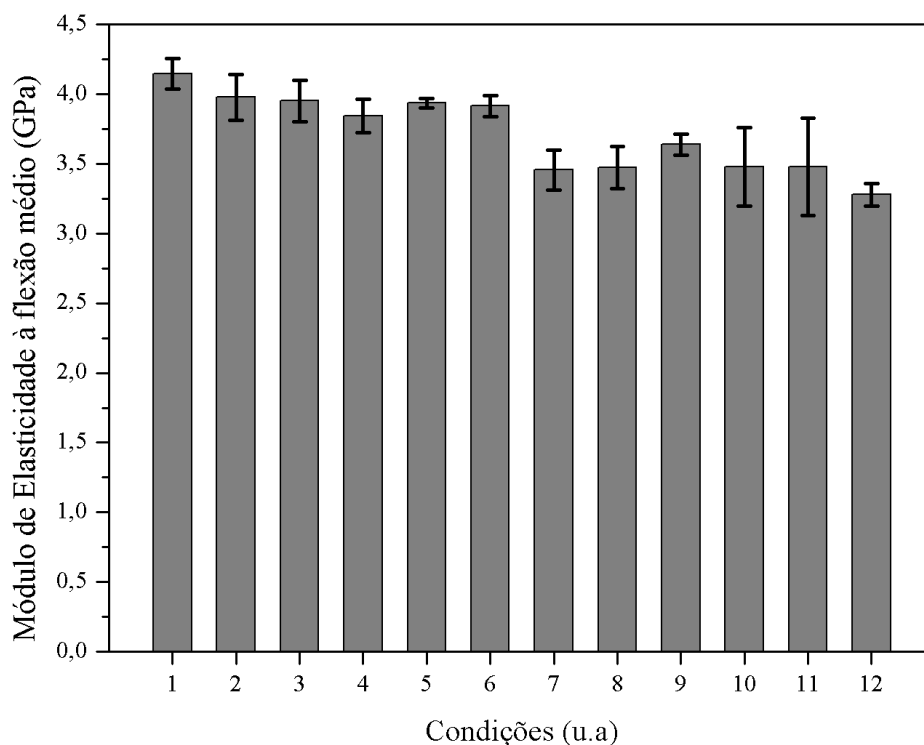


Figura 80 - Representação do Módulo de Elasticidade médio no caso 2.

A análise de variância para os fatores de combinação de cor e orientação para Tensão Máxima, apresenta os resultados na Tabela 29.

Tabela 29 - Análise de variância para a Tensão Máxima.

Fatores	GL	SQ	V	F	P
Combinação de Cor	5	42,38	8,48	0,43	0,823
Orientação	1	1527,64	1527,64	77,72	0,000
Erro	29	570,02	19,66		
Total	35	2140,04			

Dos resultados obtidos, para um intervalo de confiança de 95 % verifica-se que existe influência significativa no fator de orientação de construção.

As representações gráficas da influência dos fatores nos resultados de Tensão Máxima, podem-se observar nas Figura 81 Figura 82.

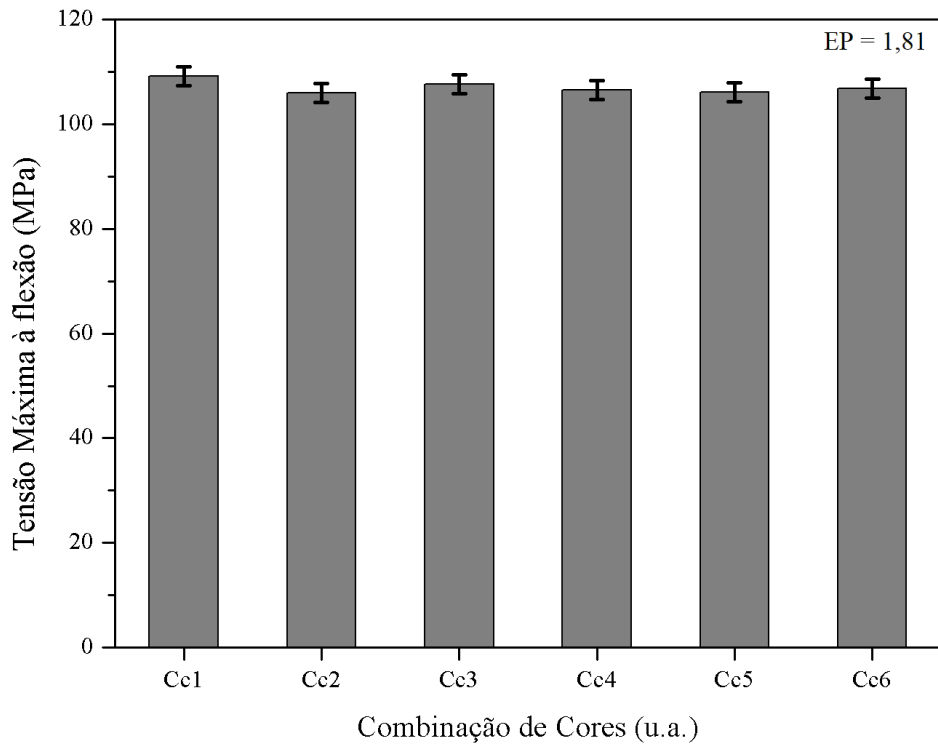


Figura 81 - Representação da influência dos níveis de combinação de cor sobre a Tensão Máxima à flexão.

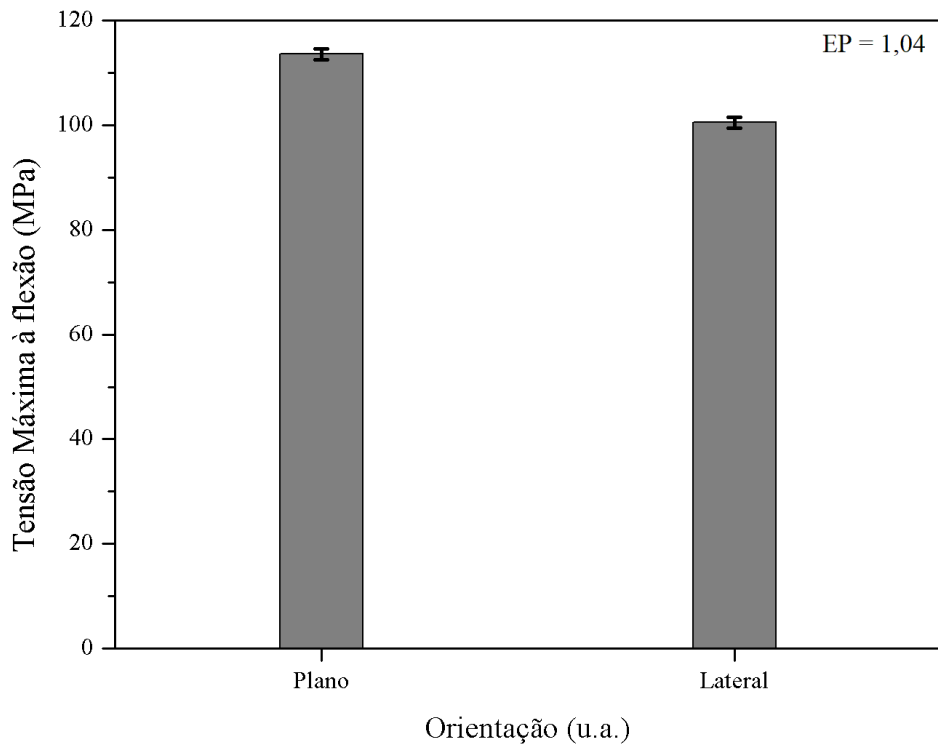


Figura 82 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Tensão Máxima à flexão.

A análise de variância para os fatores de combinação de cor e orientação para o Módulo de Elasticidade, apresenta os resultados na Tabela 30.

Tabela 30 - Análise de variância para o Módulo de Elasticidade.

<b>Fatores</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
Combinação de Cor	5	0,1668	0,03336	1,06	0,400
Orientação	1	1,7141	1,71415	54,67	0,000
Erro	29	0,9093	0,03135		
Total	35	2,7902			

As representações gráficas da influência dos fatores nos resultados de Módulo de Elasticidade, podem-se observar nas Figura 83 e Figura 84

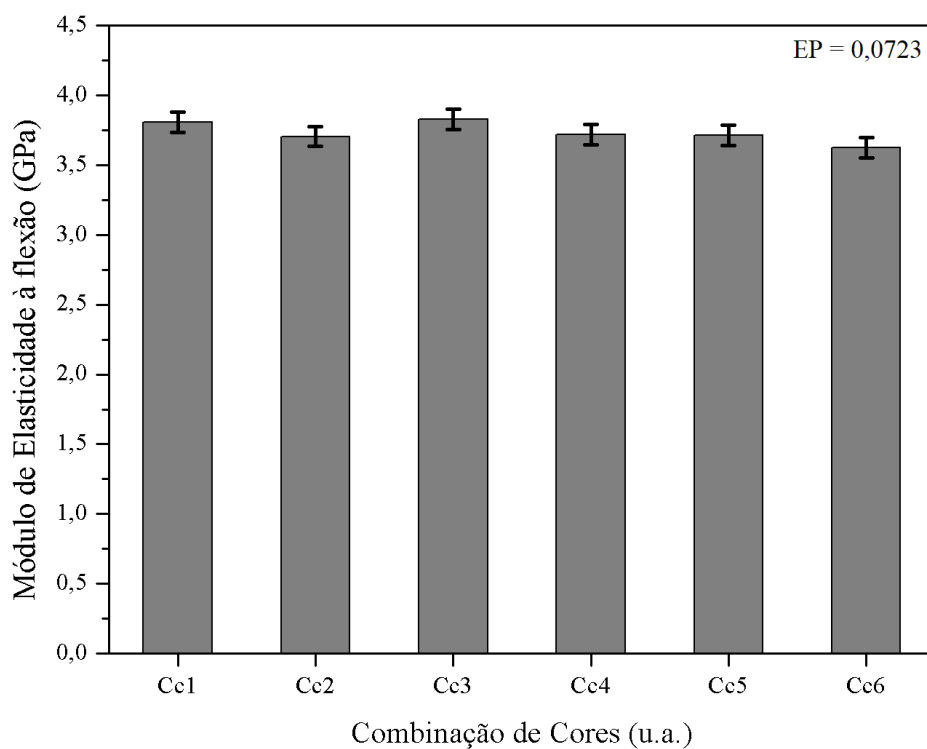


Figura 83 - Representação da influência dos níveis de combinação cor sobre a Módulo de Elasticidade à flexão.



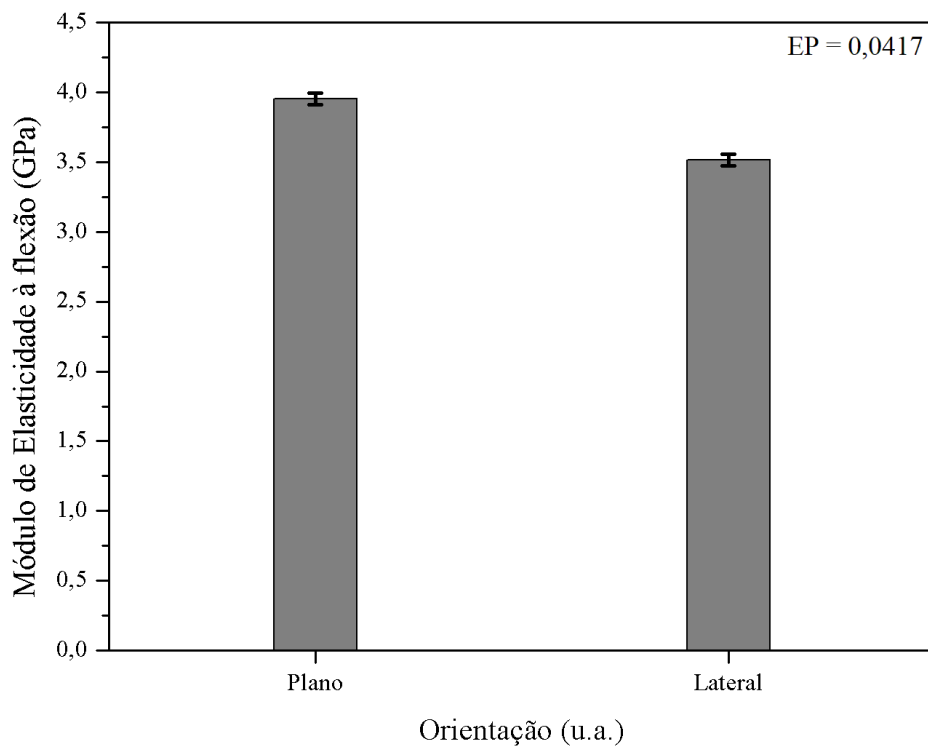


Figura 84 - Representação da influência dos níveis de orientação sobre a Módulo de Elasticidade à flexão.

Os resultados do caso de estudo 2, mostram não haver influência significativa na combinação de cores das amostras. No entanto, apresentou influência na orientação de construção das peças. A explicação pode ser obtida analisada o modo de falha das amostras ensaiadas. As amostras no plano apresentaram melhores resultados médios de Tensão Máxima e Módulo de Elasticidade relativamente à orientação lateral. O modo de rotura deu-se em todas as amostras na região de aplicação de carga, no ensaio de flexão, como demonstra a Figura 85.



Figura 85 - Modo de rotura das amostras (a) 2 da condição 2 (b) 2 da condição 3 (c) 2 da condição 11.

Na situação das amostras do plano, algumas amostras apresentaram o fenómeno apresentado na Figura 86.



Figura 86 - Modo de rotura das amostras (a) 3 da condição 12 (b) 3 da condição 10 (c) 3 da condição 4

A zona de fratura não se deu na zona de aplicação da carga, ocorrendo separação das camadas de cor que se encontravam mais afastadas da base de impressão durante o fabrico das peças. A explicação para estes resultados pode ser obtida pela influência da temperatura da base durante a fase de impressão. As peças no plano sofreram influência da temperatura da base aquecida, que permitiu uma melhor atmosfera, favorável à boa união entre as camadas. Segundo Sun *et al.* [39] variações no coeficiente de convexão no arrefecimento das peças, tem elevado efeito na mesoestrutura e na qualidade de ligação entre os filamentos. À medida que o bico extrusor se movia na direção do eixo Z, a influência da base foi diminuída, reduzindo a energia térmica necessária para que ocorresse uma boa adesão nas camadas superiores.

## 6 Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusão

O presente trabalho consistiu no estudo de funcionamento da impressora Delta do LDPS e do estudo de impressão multicolor.

O estudo do funcionamento da geometria Delta, permitiu compreender melhor o funcionamento deste tipo de impressoras e resolver problemas de calibração que surgiram durante o trabalho, e apontar possíveis trabalhos futuros de melhoria do equipamento. O processo de calibração é muitas iterativo e de tentativa e erro. O maior problema encontrado durante do trabalho, deparou-se com o sistema de rótulas magnéticas dos braços do efector. Durante o período de utilização, foi notório o desgaste presente no sistema de movimentação, que agravado pelo peso próprio do *Diamond* e o esforço lateral provocado pelos tubos de *bowden*, resultaram numa frequência crescente de desacoplamentos do efector com as rótulas durante períodos de impressão.

A utilização de uma impressora de código aberto permite um maior controlo nos parâmetros de impressão e influência nas variáveis de processo.

O estudo do bico extrusor *Diamond hotend* mostrou que a alimentação simultânea de vários filamentos, permite uma transição mais rápida de filamento, à custa de efeitos indesejáveis de mistura de cor se não se recorrerem a sistemas de purga. Os efeitos da retração também terão elevado impacto na deposição e qualidade final das peças. Com a utilização de torres de purga, foi possível obter bons resultados na transição de cor dentro da mesma camada.

Os estudos de retração e influência de tamanho também permitiram compreender que na utilização de um bico do tipo *Diamond* é necessário utilizarem-se velocidades de impressão baixas para se obterem bons resultados de acabamento.

A teoria de mistura cor, permitiu compreender a possibilidade de criar objetos multicoloridos pelo método subtrativo de cores, não tendo sido possível alcançar por limitações de *software*. Sendo alcançada permitiria com apenas três filamentos obter-se um espectro alargado de cores.

A exclusiva possibilidade de seleção de um valor unitário de temperatura num extrusor de bico único para vários filamentos, dificulta a obtenção de um valor ideal de temperatura de extrusão para cada filamento, que poderá ter influência na adesão das camadas e qualidade dos componentes.

As impressoras 3D de baixo custo apresentam baixa repetibilidade de desempenho, obtendo-se resultados distintos para as mesmas variáveis de processo. Isto foi significativo, na percentagem de amostras rejeitadas no ensaio de flexão.

Os resultados do ensaio de flexão apresentaram valores de acordo com estudos realizados para o PLA, demonstrando também não existirem efeitos significativos entre os fatores avaliados na qualidade das peças azuis, magenta e amarelo.

Os resultados obtidos do estudo de combinação de cores, demonstraram que as variações de temperatura têm um elevado impacto na ligação entre camadas de cor e nos valores de resistência mecânica obtidos. É possível concluir-se que é possível fabricar peças multicoloridas sem comprometer a resistência mecânica, no entanto é preciso ter em conta o controlo de temperatura no fabrico das peças.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos seria necessário realizar a caracterização térmica e de composição química dos materiais, com vista a entender os fenómenos de fusão e extrusão dos filamentos.

## 6.2 Trabalho futuros

O presente trabalho abordou o tema em três âmbitos: o do funcionamento da impressora de geometria delta, o estudo prático da impressão multicolor com um extrusor do tipo Diamond, e a caracterização mecânica de materiais multicoloridos. Nesse sentido, a apresentação de trabalhos futuros, apresenta-se nessa ordem. São sugeridos como trabalhos futuros:

- Modificação do sistema de movimentação para rótulas esféricas para permitir um sistema que garanta maior estabilidade e precisão na movimentação, oferecendo maior segurança em períodos longos de impressão;
- Criação de um módulo externo que inclua a unidade de alimentação dos filamentos, com uma camara fechada para proteger da degradação do material pela presença de humidade e poeiras que possam entupir o bico extrusor;
- Criação de uma enclausura, para permitir um ambiente controlado durante as impressões e evitar perturbações da adesão entre camadas de filamentos por flutuações de temperatura;
- Instalação de uma ventoinha para melhorar o acabamento superficial das peças impressas;
- Instrumentação do bico extrusor para compreender os fenómenos reológicos e otimizar o processo de impressão;
- Tentativa de mistura de cor, utilizando outra possibilidade de *software* e/ou de *firmware*;
- Atingindo a impressão de cor misturada, estudo da resistência mecânica de peças obtidas por mistura de cor e comparação de propriedades com peças das cores primárias;
- Estudo da influência de outros parâmetros de impressão na resistência mecânica de peças multicoloridas;
- Caracterização térmica e química dos materiais para uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

## Referências

- [1] I. Gibson, D. Rosen e B. Stucker , Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2015.
- [2] *ASTM F2792 - Standard for Additive Manufacturing Technologies*, 2012.
- [3] C. Bell, 3D Printing with Delta Printers, Apress, 2015.
- [4] “FDM,” Manufacturing Guide, [Online]. Available: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>. [Acedido em 2 outubro 2017].
- [5] H. Lipson e M. Kurman, Fabricated The New World of 3D Printing, John Wiley & Sons, 2013.
- [6] “Overlord 3D Printer,” [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1122205541/overlord-3d-printer-multi-color-smart-stylish>. [Acedido em 1 novembro 2017].
- [7] “HE3D K200,” [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/K200>. [Acedido em 1 novembro 2017].
- [8] “E3D Chimera,” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/chimera>. [Acedido em 11 novembro 2017].
- [9] “Geeetech rostock 301,” Geeetech, [Online]. Available: <http://www.geeetech.com/geeetech-rostock-301-mix-color-3d-printer-diy-kit-p-1008..> [Acedido em 31 outubro 2017].
- [10] “Makergeeks,” [Online]. Available: <http://makergeeks.blogspot.pt/2013/09/new-ready-to-print-dual-head-extruders.html>. [Acedido em 2 outubro 2017].
- [11] “E3D Cyclops,” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/cyclops>. [Acedido em 9 novembro 2017].
- [12] “Diamond hotend,” [Online]. Available: [http://reprap.org/wiki/Diamond\\_Hotend](http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend). [Acedido em 28 setembro 2017].
- [13] S. Han, Y. Xiao, T. Qi, Z. Li e Q. Zeng, “Design and Analysis of Fused Deposition Modeling 3D printer,” *Hindawi*, 2017.
- [14] “Diamond hotend,” [Online]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/wr3d/the-diamond-hotend-single-nozzle-multi-color-3d-pr>. [Acedido em 27 setembro 2017].
- [15] “Mosaic Manufacturing,” [Online]. Available: <https://www.mosaicmanufacturing.com/>. [Acedido em 3 dezembro 2017].
- [16] S. N. Bernier, T. Reinhard e B. Luyt, Design for 3D Printing, Maker Media, 2014.
- [17] J. Horvarth, Mastering 3D Printing, Springer, 2014.
- [18] R. Auras, L.-t. Lim, S. E. M. Selke e H. Tsuji, Poly (Lactic Acid), Wiley, 2010.
- [19] A. Bagsik, “Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts Manufactured with ULTEM 9085,” *ANTEC*, 2011.

- [20] L. Yuan, “Preliminary Research on Development of a Fiber-Composite, Curved FDM System,” National University of Singapore, Singapura, 2008.
- [21] L. Santana, J. Alves e A. Netto, “A Study of parametric calibration for low cost 3D printing: Seeking improvement in dimensional quality,” *Materials and Design*, 2017.
- [22] Q. Sun, G. M. Rizvi, P. Gu e C. T. Bellehumeur, “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments,” *Rapid Prototyping*, vol. 14, pp. 72-80, 2008.
- [23] A. Bellini, *Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design*, Philadelphia, USA: Drexel University, 2002.
- [24] A. Bellini e S. Güçeri, “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 9, pp. 252-264, 2003.
- [25] R. Weeren, M. Agwarala, V. R. Jamalabad e A. Bandyopadhyay, “Quality of Parts Processed by Fused Deposition,” 1996.
- [26] A. Bellini, S. Güçeri e M. Bertoldi, “Liquefier Dynamics in Fused Deposition,” 2004.
- [27] B. M. Tymrak, M. Kreiger e J. M. Pearce, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,” *Material and Design*, 2014.
- [28] B. Wiitbrodt e J. M. Pearce, “The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components,” *Additive Manufacturing*, 2015.
- [29] R. J. Young e P. A. Lovell, *Introduction to Polymers*, CRC Press, 2011.
- [30] L. Santana, C. H. Ahrens, A. d. C. S. Netto, G. Oliveira e C. Merlini, “Avaliação da composição química e das características térmicas de filamentos de PLA para impressoras de código aberto,” *CONEM*, 2016.
- [31] L. Santana, “Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA,” dissertação de mestrado UFSC, Florianópolis, 2015.
- [32] H. Kim, E. Park, S. Kim, B. Park, N. Kim e S. Lee, “Experimental Study on Mechanical Properties of Single and Dual-Material 3D Printed Products,” *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 887-897, 2017.
- [33] T. Abreu, “Desenvolvimento de uma impressora FDM tipo Delta,” dissertação de mestrado FEUP/DEMec, 2017.
- [34] J. Abreu, S. Castellanos e J. L. Alves, “Desenvolvimento de uma impressora 3D do Tipo Delta,” *Tecnometal*, vol. 229, pp. 8-19, 2017.
- [35] J. Regadas, “Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores,” dissertação de mestrado FEUP/DEMec, 2017.
- [36] “How to test,” Make, [Online]. Available: <https://makezine.com/comparison/3dprinters/how-we-test/>. [Acedido em 12 janeiro 2018].
- [37] “Delta Advanced Calibration tool,” [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:745523>. [Acedido em 27 novembro 2017].

- [38] “MakerGear Guide,” [Online]. Available: <http://apm-designs.com/makergear-m2-guide>. [Acedido em 9 outubro 2017].
- [39] “Sunon,” [Online]. Available: [http://www.sunon.com/uFiles/file/03\\_products/08-catalog%20download/Sunon%20DC%20Brushless%20Fan%20&%20Blower\\_\(240-E\).pdf](http://www.sunon.com/uFiles/file/03_products/08-catalog%20download/Sunon%20DC%20Brushless%20Fan%20&%20Blower_(240-E).pdf). [Acedido em 26 novembro 2017].
- [40] “PID autotune,” [Online]. Available: <http://marlinfw.org/docs/gcode/M303.html>. [Acedido em 26 novembro 2017].
- [41] G. B. Silveira, V. M. A. Santos, L. B. Hinkel, L. Santana e G. S. Vieira, “Desenvolvimento de plataforma de construção para impressora 3D,” em *SEPEI*, Santa Catarina, 2015.
- [42] “Print Quality Troubleshooting,” Simplify 3D, [Online]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>. [Acedido em 9 outubro 2017].
- [43] “Firmware Retraction,” [Online]. Available: <http://marlinfw.org/docs/features/fwretract.html>. [Acedido em 10 novembro 2017].
- [44] D. G. Ullman, “The Mechanical Design Process,” McGraw-Hill, 1997.
- [45] “Tri-colour Traffic Cone,” [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:49702>. [Acedido em 4 dezembro 2017].
- [46] B. Evans, *Practical 3D Printers*, Springer, 2012.
- [47] S. G. González, *Impresión 3D*, Marcombo, 2016.
- [48] “Twisted vase,” [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:153994>. [Acedido em 2 dezembro 2017].
- [49] “Repetier Color Mixing,” [Online]. Available: [http://www.reprap.org/wiki/Repetier\\_Color\\_Mixing](http://www.reprap.org/wiki/Repetier_Color_Mixing). [Acedido em 3 novembro 2017].
- [50] “Make Magazine,” [Online]. Available: <https://makezine.com/>. [Acedido em 20 outubro 2017].
- [51] “Make 2017 Printing test,” [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2755063>. [Acedido em 13 janeiro 2018].
- [52] “Filamento BQ,” [Online]. Available: <https://www.bq.com/pt/pla>. [Acedido em 15 novembro 2017].
- [53] ASTM, *D790*, 2010.
- [54] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt e J. M. Pearce, “Tensile Strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing,” *Additive Manufacturing*, 2017.
- [55] T. Letcher, “Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer,” *IMECE2014*, 2014.
- [56] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza e P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Materials and Design*, vol. 124, pp. 143-157, 2017.



## ANEXO A: ANOVA do ensaio de retração

As Figura 87 e Figura 88 apresentam os resultados de influência dos fatores no valor de massa do ensaio de retração.

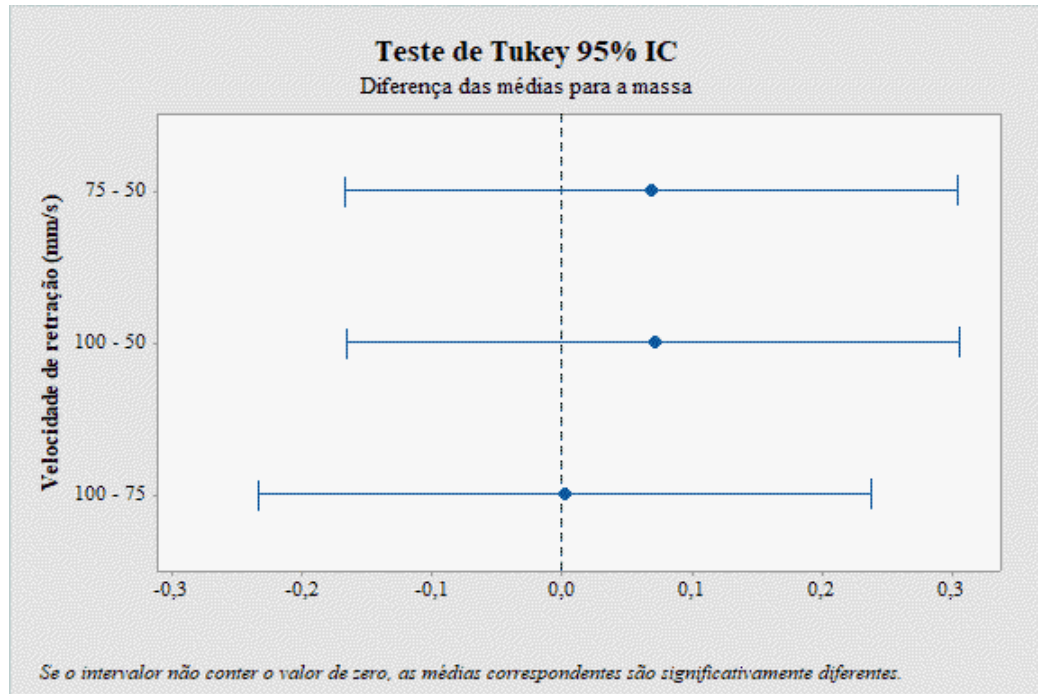


Figura 87 - Gráfico do teste de Tukey para a diferença das médias para a massa.

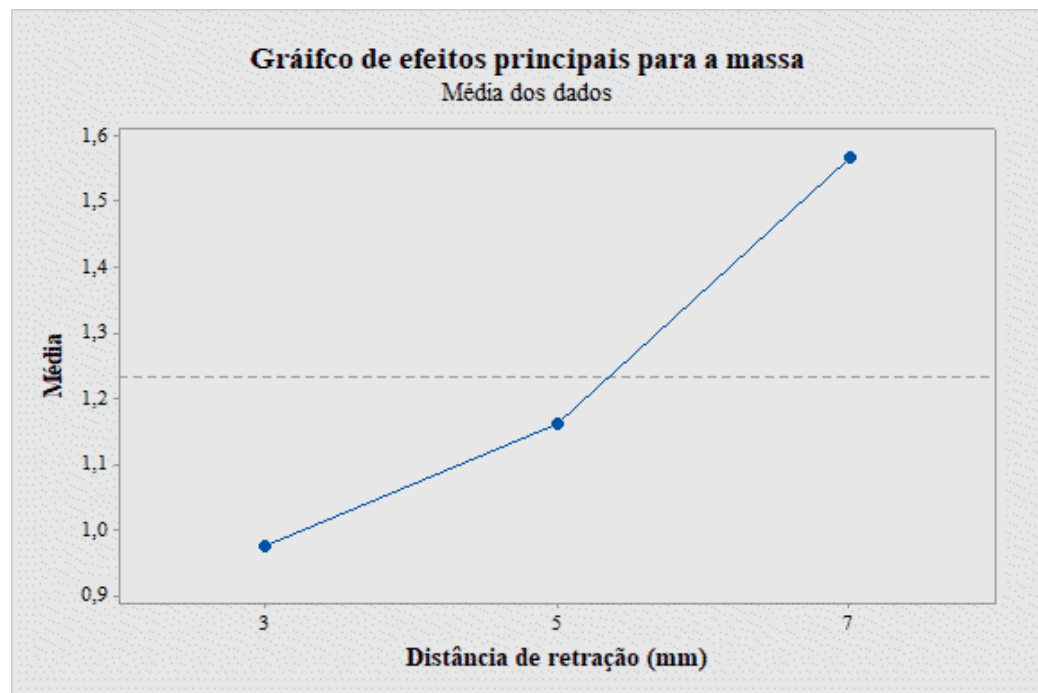



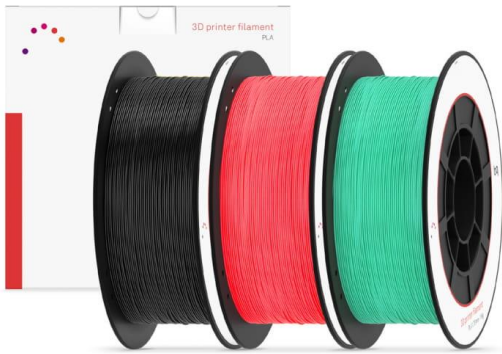
Figura 88 - Gráfico de efeitos principais para a massa segundo a média dos dados.

## ANEXO B: Ficha técnica do filamento BQ

A Figura 89 apresenta a ficha técnica do filamento utilizado no ensaio de flexão.



# PLA Filament 1.75 mm



**i** PLA (Polylactic acid) is the best material for getting started with your 3D printer, as it:

- Hardens quickly
- Has minimal thermal tension
- Has minimal deformation
- Does not require Kapton tape
- Does not require heated bed
- Acetone-resistant

BQ PLA filament is made from 100% PLA.  
PLA is a biodegradable product obtained from plant-derived sugars.

**⚙️** Flexural elastic modulus: 3600 MPa (ISO 178)  
Flexural strength: 108 MPa (ISO 178)  
Hardness: 85 Sh D (ASTM D2240)


















	Injection-moulded test pieces	Printed test pieces <sup>1</sup>	Printed test pieces <sup>2</sup>
Tensile strength at break <sup>3</sup>	52 MPa	50 MPa	39 MPa
Tensile elongation at break <sup>3</sup>	5%	9%	4%
Tensile modulus <sup>3</sup>	1320 MPa	1230 MPa	1120 MPa

<sup>1</sup> Stretched parallel to layers  
<sup>2</sup> Stretched perpendicular to layers  
<sup>3</sup> ISO 527

**⚖️** Filament Diameter: 1.75 mm  
Thickness: 1.24 g/cm<sup>3</sup> (ASTM D792)  
Weight: 1 kg  
Spool Size: 195 mm x 73 mm

**🔥** Recommended printing temperature: 200/220 °C  
Heat distortion temperature: 56 °C (ISO 75/2B)  
Melting temperature: 145/160 °C (ASTM D3418)  
Glass Transition Temperature: 56/64 °C (ASTM D3418)

**✓** Compatible with: any printer that uses 1.75 mm filament

SKU: F000097  Coral	SKU: F000098  Turquoise	SKU: F000099  Violet	SKU: F000100  Sulphur yellow	SKU: F000101  Topaz blue
SKU: 05BQFIL023  Aubergine	SKU: 05BQFIL024  Magenta	SKU: 05BQFIL025  Sky blue	SKU: 05BQFIL026  Coal black	SKU: 05BQFIL027  Pure white
SKU: 05BQFIL028  Vitamine orange	SKU: 05BQFIL029  Ruby red	SKU: 05BQFIL030  Grass green	SKU: 05BQFIL031  Bottle green	SKU: 05BQFIL032  Ash grey
SKU: 05BQFIL033  Transparent	SKU: 05BQFIL034  Sunshine yellow			




Figura 89 - Ficha técnica do filamento BQ.

## ANEXO C: Curvas tensão deformação das amostras

As curvas de tensão-deformação das condições 1 e 4 do caso de estudo 1 e das condições 1, 7, 3 e 9 do caso de estudo 2 estão representados nos gráficos das Figuras 90 a 95.

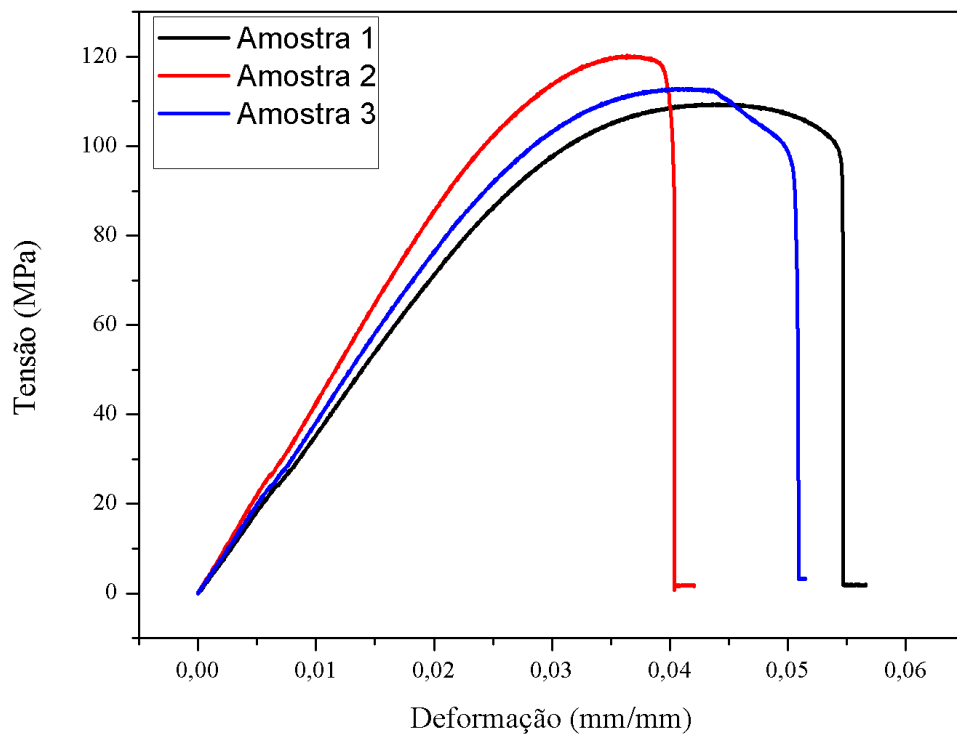


Figura 90 - Curva tensão-deformação da condição 1 do caso de estudo 1.

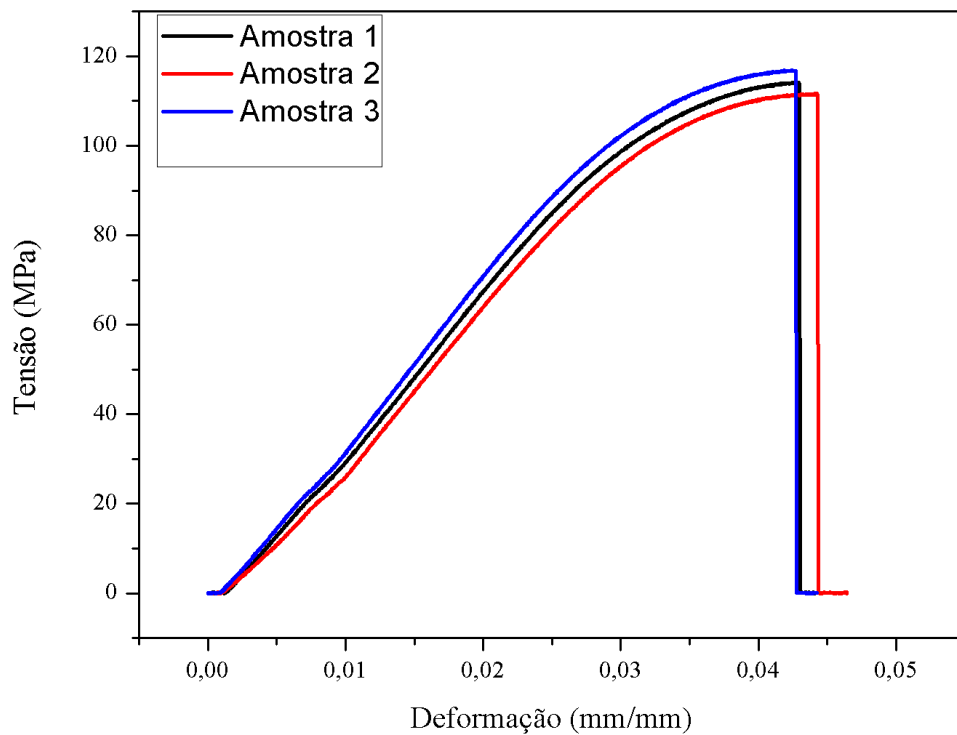


Figura 91 - Curva tensão-deformação da condição 4 do caso de estudo 1.

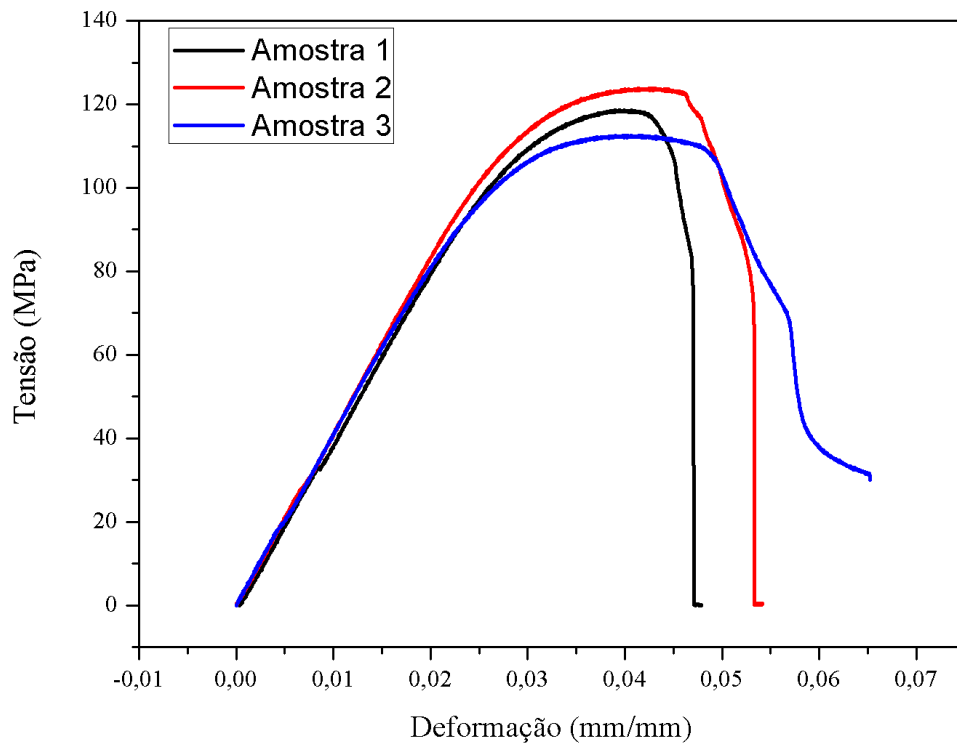


Figura 92 - Curva tensão-deformação da condição 1 do caso de estudo 2.

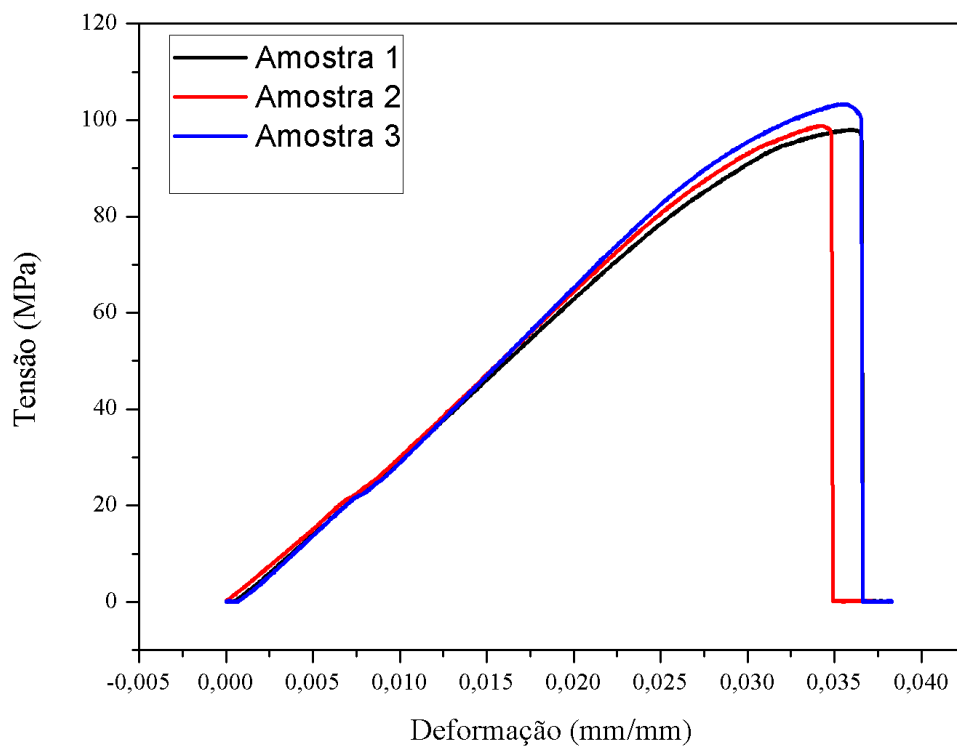


Figura 93 - Curva tensão-deformação da condição 7 do caso de estudo 1.

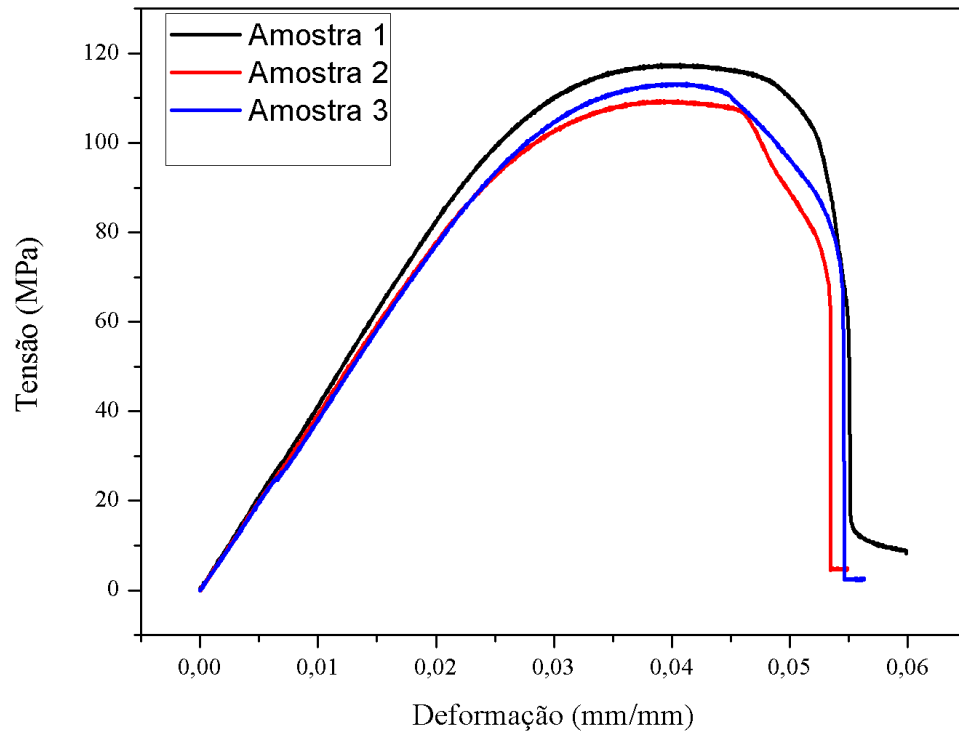


Figura 94 - Curva tensão-deformação da condição 3 do caso de estudo 2.

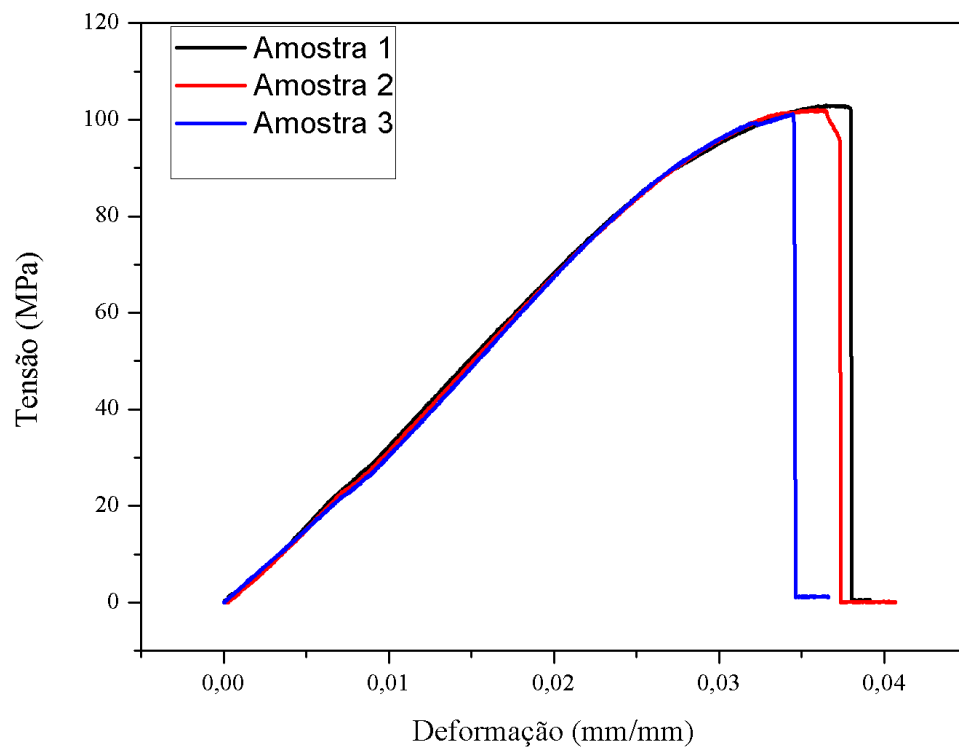


Figura 95 - Curva tensão-deformação da condição 9 do caso de estudo 2.